



world ocean review 

Mit den Meeren leben.

2014

3

Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken

Herausgegeben von
maribus in Kooperation mit



ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN



mare



world ocean review

Mit den Meeren leben.

2014



3

Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken

Vorwort

Nach unserem zweiten „World Ocean Review“, der sich mit der Fischerei beschäftigte, freue ich mich, nun die dritte Ausgabe präsentieren zu können. In diesem „World Ocean Review“, kurz WOR 3, fokussieren wir auf die Rohstoffe im Meer und die damit verbundenen Chancen und Risiken, wenn wir diese nutzen.

Zwei Tatsachen fallen dabei besonders ins Auge. Zum einen, dass die Kenntnisse über die Rohstoffe in den Ozeanen noch sehr gering sind und die technischen Herausforderungen zur Erkundung und vor allem zur deren Förderung sich als immens darstellen. Zum anderen, dass das Wissen um die Rohstoffe sowie deren Nutzung noch keinen angemessenen Raum in der Öffentlichkeit einnehmen. Öl, Gas, Mineralien oder auch Methanhydrate liegen im tiefen Dunkel der Ozeane, und der Abbau findet außerhalb unserer Wahrnehmung statt. Selbst die aus ihnen gefertigten Produkte sind im Alltag nicht immer ersichtlich und greifbar. Das steht im Kontrast zu den guten Kenntnissen über Fische und dem selbstverständlichen öffentlichen Interesse am Fischfang. Nahrung aus dem Meer ist ein elementarer Bestandteil unseres Lebens und seit Jahrtausenden in unserem Bewusstsein. Insofern ist eine Sensibilisierung der Menschen für die Probleme im Zusammenhang mit der Fischerei vergleichsweise einfach. Eben beginnt die Politik sich aufgrund des wachsenden öffentlichen Druckes – auch durch Publikationen wie den WOR 2 – einer nachhaltigeren Fischerei zuzuwenden, mit der Hoffnung, das Aussterben von vielen Fischarten noch einmal abzuwenden.

Daraus folgt, dass es noch ein weiter Weg ist, die Kenntnisse über die Rohstoffe im Meer zu vertiefen und vor allem einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Noch entscheidender scheint mir aber die Diskussion über die Nutzung dieser nicht lebenden Ressourcen der Meere. Denn ohne unser natürliches kollektives Interesse an den vielfältigen Problemen wird kein Druck erzeugt werden können, der dafür sorgt, dass Meeresrohstoffe umweltschonend abgebaut und nachhaltig genutzt werden.

Sie werden auf den folgenden Seiten über die Entstehung, Erforschung und Förderung von Öl und Gas lesen, aber auch von Erzen in Form von Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfiden. Neben diesen Mineralien wird auch den Methanhydraten ein Kapitel gewidmet. Alle diese Ressourcen sind nicht nur technisch schwer abbaubar und extrem umstritten wegen der Umweltrisiken, sondern sie bilden die auch politisch bedeutsame Grundlage für einen gewaltigen Wirtschaftsmarkt mit allergrößten Ertragschancen.

Wenn abseits unserer Wahrnehmung riesige Geschäfte locken, dann gerät nicht nur die Umwelt in Gefahr, sondern auch elementare Menschenrechte und soziale Gerechtigkeit. Insbesondere Großkonzerne wie Shell, ExxonMobil oder Total, die seit Jahren in Westafrika Öl fördern, sahen in der Vergangenheit weder im Schutz der Natur noch in einer fairen Teilhabe der Bevölkerung an den Erlösen aus dem Ölgeschäft eine Notwendigkeit.

Es liegen immense Chancen, aber auch Risiken für die Zukunft auf und in dem Meeresboden. Ich hoffe, Sie finden im WOR 3 die notwendigen Fakten dazu.



Nikolaus Gelpke

Geschäftsführer maribus gGmbH, Verleger des mareverlags und Präsident des IOI

Wir Menschen leben seit Ewigkeiten mit dem Meer und nutzen seine Dienstleistungen. Wir suchen die Nähe zum Meer, denn der Küstenraum bringt seinen Bewohnern viele Vorteile. Mit der rasant wachsenden Bevölkerungszahl machen sich viele von uns Gedanken um die Zukunft des Ozeans und der Küsten. Wie lassen sich Schutz und Nutzen ausbalancieren? Ist eine Entwicklung zur nachhaltigen Nutzung des Meeres denkbar?

Diese Fragen stellen sich insbesondere bei mineralischen und energetischen Ressourcen des Meeres. Schnell nachwachsende Ressourcen wie zum Beispiel Fisch, Muscheln und Algen lassen sich prinzipiell nachhaltig nutzen, wenn man den Lebensraum sichert und die Ernte so reguliert, dass genug im Meer bleibt und damit der Nachwuchs gesichert ist. Die Herausforderungen am Beispiel des Fischfangs wurden im zweiten „World Ocean Review“ beleuchtet. Mineralische und energetische Ressourcen aber entstehen im Laufe von vielen Millionen von Jahren. Es gibt für kommende Generationen nur eine endliche Menge dieser Ressourcen. Sie liegen oft Hunderte von Metern unter dem Meeresboden und sind nur mit komplexer Technologie zu fördern. Wie soll eine faire und möglichst nachhaltige Nutzung dieser Ressourcen aussehen? Kann man die Umweltbelastungen durch ihren Abbau minimieren?

Die dritte Ausgabe des „World Ocean Review“ widmet sich diesen metallischen und energetischen Ressourcen des Meeres und ihrer Nutzung. Er liefert Fakten über die Menge der bekannten Öl- und Gasvorkommen unterhalb des Meeresbodens, der festen Gashydratvorkommen an den Kontinentalrändern. Er gibt Informationen über das Potenzial von drei großen Typen der mineralischen Rohstofflagerstätten: den Manganknollen, den Kobaltkrusten und den Massivsulfiden.

Methanhydrate sind derzeit verstärkt in der Diskussion. Dem eisförmigen Erdgas werden große Vorkommen attestiert – möglicherweise mehr als die Summe der verbleibenden Öl- und Gasvorkommen zusammen. Es gibt erste Pläne, die Gashydrate an den Kontinentalrändern abzubauen. Das birgt Risiken, aber auch Chancen. Das Methanhydrat lässt sich sauberer verbrennen als der Energieträger Kohle. Könnte der Abbau von Methanhydraten eine Brückentechnologie bei dem Übergang zur nachhaltigen Energiegewinnung für unsere Gesellschaft sein?

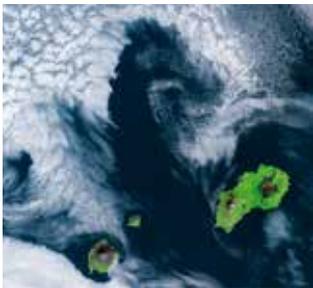
Die Rohstoffe im Meer haben großes Potenzial, und man könnte sie teilweise auch zeitnah profitabel abbauen. Aber solch ein Abbau ist auch mit relativ großen Risiken und potenziell dramatischen Meeresumweltbelastungen verbunden. Wollen wir das? Falls nicht, welche Möglichkeiten gibt es dem entgegenzuwirken? Welche Rahmenbedingungen müssen auf den nationalen und globalen politischen Bühnen verhandelt werden?

Die Zukunft der Ozeane ist eng verbunden mit der Zukunft der Ressourcengewinnung aus dem Meer und dem Küstenraum und damit der Zukunft von vielen, wenn nicht allen Menschen. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine spannende und erhellende Lektüre.



Prof. Dr. Martin Visbeck

Sprecher des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“



Vorwort 4

Öl und Gas aus dem Meer **Kapitel 1**

Den Energiehunger stillen 10
 Erdgas und Erdöl gewinnen..... 20
 Von der Verölung der Ozeane 36
 CONCLUSIO:
 Weniger Ölverschmutzung im Meer – trotz steigenden Energiebedarfs 51

Tagebau am Meeresgrund **Kapitel 2**

Rohstoffe für die Welt 54
 Begehrte Manganknollen 66
 Metallreiche Krusten 74
 Massivsulfide – im Rauch der Tiefe 82
 CONCLUSIO:
 Der Meeresbergbau – kein Goldtausch, aber eine Option 93

Energie aus brennendem Eis **Kapitel 3**

Vom Plankton zum Hydrat 96
 Methanhydrat – eine neue Energiequelle? 104
 Die Folgen des Hydratabbaus 112
 CONCLUSIO:
 Wertvoller Rohstoff oder Treibhausgas? 117

Umweltschonende Förderung und gerechte Verteilung **Kapitel 4**

Von der Verantwortung der Staatengemeinschaft 120
 Von der Eigenverantwortung der Küstenstaaten..... 132
 CONCLUSIO:
 Ist eine sichere und gerechte Meeresnutzung möglich? 143

Gesamt-Conclusio 145

Glossar 149
 Abkürzungen 150
 Mitwirkende 152
 Quellenverzeichnis 154
 Abbildungsverzeichnis 157
 Index 158
 Partner und Danksagung 163
 Impressum 164

1 Öl und Gas aus dem Meer



> Erdgas und Erdöl werden schon seit mehr als 100 Jahren aus dem Meer gewonnen. Da heute viele Lagerstätten im flachen Meer bereits ausgebeutet sind, dringt man in immer größere Tiefen vor. Doch obwohl die Förderraten hoch wie nie sind, geht die Ölverschmutzung insbesondere aufgrund strenger Auflagen für den Schiffsverkehr zurück. Die Explosion der Bohrinsel „Deepwater Horizon“ allerdings zeigt, dass die Sicherheit bei der Ölförderung lange vernachlässigt wurde.



Den Energiehunger stillen

> Rund ein Drittel der weltweiten Erdgas- und Erdölmengen wird im Meer gewonnen. Dieser Anteil wird sich in den kommenden Jahrzehnten noch erhöhen, denn die ozeanischen Lagerstätten bergen noch enorme Vorräte. Allerdings müssen die Konzerne in immer größere Meerestiefen vordringen, weil viele Gas- und Ölfelder im Flachwasser bereits weitgehend ausgebeutet sind.

Rohstoffe aus dem Meer seit mehr als 100 Jahren

Erdgas und Erdöl werden schon lange aus dem Meer gefördert. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts errichtete man in den Vereinigten Staaten von Amerika erste Ölbohrtürme vor der Küste. Als ein Pionier gilt der Industrielle Henry L. Williams, der in den 1890er Jahren Öl aus dem Summerland-Feld bei Santa Barbara in Kalifornien förderte. Die ersten Fördertürme ließ er noch an Land bauen, 1896 wagte er schließlich den Schritt ins Wasser. Er ließ eine 100 Meter lange Pier errichten und trieb von dort eine Bohrung in den Meeresboden. Nachahmer ließen nicht lange auf sich warten. Innerhalb von 5 Jahren entstanden in der Umgebung 14 weitere Piers mit 400 Förderbohrungen.

Für die Pioniere der Ölförderung war es unvorstellbar, Bohrtürme weit draußen auf dem Meer zu errichten. Ihre Anlagen standen in wenige Meter tiefem Wasser und waren über die Piers mit dem Land verbunden. Heute ist das anders. Die Gas- und Ölförderung auf hoher See ist ein Alltagsgeschäft. Weltweit gibt es aktuell etwa 900 große

Plattformen, auf denen Öl und Gas gefördert wird. Im Laufe der Zeit sind die Ingenieure in immer größere Meerestiefen vorgestoßen, weil mit dem steigenden Ölpreis die kostspielige Gas- und Ölgewinnung in der Tiefe rentabel geworden ist.

Auch die Weiterentwicklung der Bohr- und Förder-technik trägt dazu bei, dass aus immer größeren Wassertiefen gefördert werden kann. Den Tiefenrekord in der Ölförderung hält derzeit ein internationaler Ölkonzern mit einer Bohrinself im Tobago-Feld im Golf von Mexiko mit 2934 Meter Wassertiefe. In der Gasförderung liegt der Tiefenrekord derzeit bei rund 2700 Metern. Die Gasplattform befindet sich ebenfalls im Golf von Mexiko im Cheyenne-Gasfeld.

Immer mehr Energie für Autos, Heizung und Strom

Der Energiehunger der Menschheit ist enorm groß. So belief sich der Primärenergieverbrauch im Jahr 2011 auf 12 274 Millionen Tonnen Öleinheiten. Das entspricht dem 40-Fachen des jährlichen Energieverbrauchs von Deutschland. Die Öleinheit ist ein Maß, das verwendet wird, um den Verbrauch der verschiedenen Energierohstoffe miteinander vergleichen zu können. 1 Tonne Öleinheit entspricht dabei dem Energiegehalt 1 Tonne Rohöl.

Zwar ist der Energieverbrauch in Europa in den vergangenen Jahren durch den Einsatz moderner Maschinen und effizienter Elektromotoren, durch Energiesparmaßnahmen und eine bessere Dämmung von Gebäuden zurückgegangen. Weltweit betrachtet aber nimmt der Energieverbrauch zu. Seit Anfang der 1970er Jahre hat er sich verdoppelt. Bis zum Jahr 2035 wird er sich nach Angaben der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency, IEA) nochmals um mehr als ein Drittel erhöht haben.

1.1 > Schon Ende des 19. Jahrhunderts wagten Ölpioniere den Schritt ins Meer. Anfangs waren die Fördertürme über Piers mit dem Land verbunden.

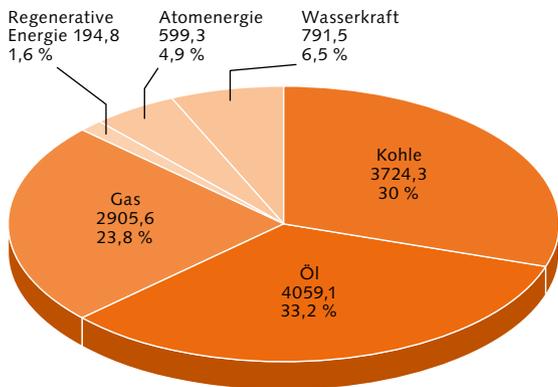


Generell sind die Ursachen für den wachsenden Energiehunger insbesondere das Bevölkerungswachstum in Asien sowie die fortschreitende Industrialisierung in den Schwellenländern. Dabei entfallen ungefähr 60 Prozent dieses Zuwachses allein auf China, Indien und den Nahen Osten.

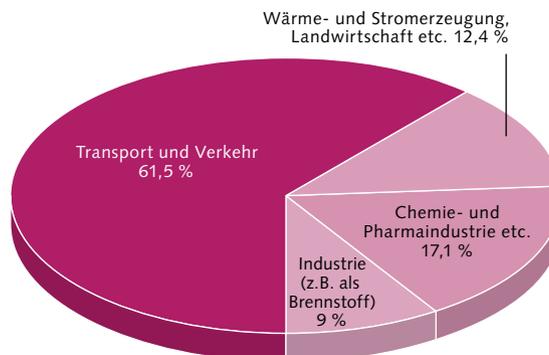
Heute wird die meiste Energie aus der Verbrennung der fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl oder Kohle gewonnen. Die Ölpioniere hätten sich vermutlich nie träumen lassen, wie viel die Menschheit einmal verbrennen oder auch industriell nutzen würde. Unsere moderne Welt ist fast gänzlich von fossilen Rohstoffen abhängig. Wir benötigen sie zum Heizen, für die Stromproduktion und natürlich als Treibstoff für Kraftfahrzeuge, Bahnen, Flugzeuge und Schiffe. So sind heute weltweit mehr als 1 Milliarde Autos, Busse und Lastwagen in Betrieb, die große Mengen Benzin oder Diesel verbrennen.

Öl hält die Welt in Gang

Der wichtigste fossile Brennstoff ist heute Erdöl, gefolgt von Kohle und Erdgas. Erdöl hatte im Jahr 2011 einen Anteil von rund 33 Prozent am weltweiten Primärenergieverbrauch. Der Anteil der Kohle betrug rund 30 und der von Erdgas rund 24 Prozent. Die restlichen Anteile entfal-



1.2 > Öl und Kohle sind weltweit die wichtigsten fossilen Brennstoffe. Die Abbildung zeigt den nach Energiequellen aufgeteilten globalen Primärenergieverbrauch im Jahr 2011 und die jeweiligen prozentualen Anteile. Für das Öl ist der Primärenergieverbrauch in Millionen Tonnen Öl angegeben. Für die anderen Energiequellen wurde der Primärenergieverbrauch in Öleinheiten (Angaben in Millionen Tonnen Öleinheiten) umgerechnet.



1.3 > Öl wird überwiegend im Sektor Transport/Verkehr eingesetzt. Es spielt aber auch eine wichtige Rolle als Grundstoff, beispielsweise in der chemischen Industrie.

len auf Atomenergie, Wasserkraft und andere erneuerbare Energien wie zum Beispiel Solar- und Windenergie. Im Jahr 2011 wurden weltweit rund 4 Milliarden Tonnen Öl gefördert. Davon wurden allein 61,5 Prozent im Bereich Transport und Verkehr verbraucht. Öl ist aber nicht nur Brennstoff, sondern auch ein wichtiger Grundstoff für die Pharma- und Chemieindustrie, beispielsweise für die Kunststoffproduktion. Autolacke, Frischhaltedosen oder TV-Geräte, in allen stecken Substanzen, die aus Öl gewonnen werden.

Der größte Erdölverbraucher sind heute die USA. Es folgen China, dessen Volkswirtschaft seit Jahren immens wächst, das stark industrialisierte Japan und das aufstrebende Schwellenland Indien. Russland hält Platz 5, verbraucht aber nur ein Sechstel der US-Ölmenge. Der weltweite Ölkonsum ist 2011 um 2,7 Prozent gegenüber dem Vorjahr gestiegen. Am stärksten stieg der Verbrauch mit 6,1 Prozent im sogenannten australasiatischen Raum. In Europa hingegen ging der Verbrauch um 1,2 Prozent zurück.

Strom und Wärme aus Gas

Im Jahr 2011 wurden weltweit 3337 Milliarden Kubikmeter Erdgas gefördert. Diese Menge entspricht dem 35-Fachen des jährlichen Gasverbrauchs in Deutschland. Der durchschnittliche Jahresverbrauch eines deutschen Haushalts liegt bei etwa 3500 Kubikmetern. Erdgas wird insbesondere zum Heizen und zur Stromgewinnung sowie in der chemischen Industrie als Rohstoff eingesetzt, zum Beispiel für die Wasserstoffproduktion, die Ammoniaksynthese und die Stickstoffdüngerherstellung. In Deutschland, Dänemark, anderen europäischen Ländern

Primärenergie
Mit Primärenergie bezeichnet man jene Energie, die man in einem Kraftwerk, Ofen oder in einem Motor aufwenden muss, um elektrischen Strom, Wärme oder Bewegung zu erzeugen. Darüber hinaus gibt es den Begriff der Endenergie. Damit bezeichnet man Energie, die der Verbraucher direkt in Form von Strom und Heizwärme nutzt.

und auch in China ersetzt Erdgas zunehmend Kohle als Brennstoff für Kraftwerke. Denn Gas verbrennt sauberer als Kohle. Das Gas wird dabei in modernen Gas- und

Dampfkraftwerken eingesetzt, die zugleich Strom produzieren

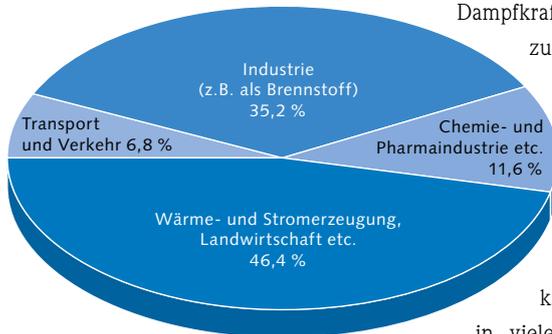
und die Abwärme nutzen und dadurch einen besonders hohen Wirkungsgrad haben, die Energie also besonders gut aus-

nutzen. Klassische Kohlekraftwerke hingegen liefern in vielen Fällen nur Strom. Die

Abwärme bleibt ungenutzt. In Europa sank die Gasnachfrage zwischen 2010 und 2011 um 8 Prozent. Gründe dafür waren die schwache Wirtschaft, relativ hohe Preise, warmes Wetter, aber auch der kontinuierliche Ausbau erneuerbarer Energien. Weltweit gesehen hingegen stieg der Erdgasverbrauch im selben Zeitraum um 2 Prozent.

Der Grund ist die starke Nachfrage in Asien und in den Schwellenländern. China zum Beispiel erhöhte seinen Verbrauch um 20 Prozent. Japan wiederum importierte nach dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi 19 Prozent mehr Erdgas. Aufgrund seiner Insellage führt Japan Gas in flüssiger Form (Liquefied Natural Gas, LNG) auf dem Seeweg ein. Weil das teurer ist als der Transport per Pipeline, sind die Gaspreise in Japan vergleichsweise hoch.

Im weltweiten Vergleich waren die Vereinigten Staaten von Amerika im Jahr 2011 der größte Erdgasverbraucher, gefolgt von der Russischen Föderation und dem Iran. Der hohe Verbrauch im Iran ist einerseits auf einen großen Gasbedarf durch die Gebäudeheizung aufgrund kalter Winter und andererseits auf die Injektion von Gas in Ölfelder zurückzuführen. Durch das Einpressen wird das Öl aus den Lagerstätten herausgedrückt. Auf Platz 4 der Liste der größten Erdgasverbraucher steht China, auf Platz 5 Japan.



1.4 > Erdgas wird zum größten Teil für die Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt.

1.5 > Die Vereinigten Staaten von Amerika führen die Liste der 10 größten Ölverbraucher mit weitem Abstand an.

1.6 > Auch was Erdgas angeht, sind die USA die größten Verbraucher. Ähnlich wie beim Öl stehen allein die 10 größten Länder für gut 60 Prozent des weltweiten Gesamtbedarfs.

Mineralölverbrauch 2011		
Rang – Land/Region	Milliarden Tonnen	Anteil in %
1 Vereinigte Staaten	814,6	20,1
2 China	457,9	11,3
3 Japan	221,7	5,5
4 Indien	162,3	4,0
5 Russische Föderation	136,0	3,4
6 Saudi-Arabien	121,1	3,0
7 Brasilien	120,7	3,0
8 Deutschland	111,9	2,8
9 Republik Korea	110,8	2,7
10 Mexiko	105,9	2,6
Übrige Welt	1682	41,6
Gesamt	4044,9	100

Erdgasverbrauch 2011		
Rang – Land/Region	Milliarden Kubikmeter	Anteil in %
1 Vereinigte Staaten	690,1	20,8
2 Russische Föderation	474,3	14,3
3 Iran	153,3	4,6
4 China	130,7	3,9
5 Japan	112,5	3,4
6 Kanada	104,8	3,2
7 Saudi-Arabien	92,2	2,8
8 Deutschland	84,4	2,5
9 Ver. Königreich	80,2	2,4
10 Italien	77,9	2,3
Übrige Welt	1316,9	39,7
Gesamt	3317,3	100

Reserven oder Ressourcen?

In der Diskussion um die Endlichkeit der fossilen Rohstoffe werden die Begriffe Reserve und Ressource, aber auch Reichweite und statische Reichweite häufig synonym verwendet, obwohl sie sich in einigen Aspekten voneinander unterscheiden.

Reserve: Damit ein Erdöl- oder Erdgasvorkommen als Reserve eingestuft wird, muss es 3 Bedingungen erfüllen: Erstens muss das Vorkommen durch Bohrungen bestätigt und der Vorrat mit großer Genauigkeit erfasst worden sein. Zweitens muss das Vorkommen mit heutiger Technik förderbar sein. Drittens muss die Förderung bei heutigen Rohstoffpreisen wirtschaftlich sein.

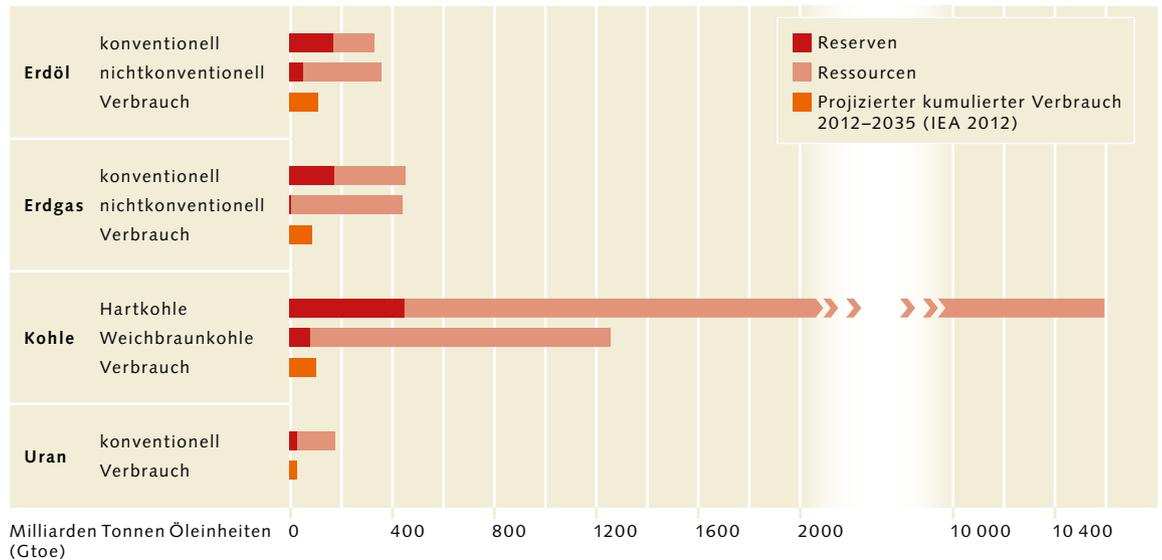
Ressource: Ressourcen sind einerseits die Mengen eines Energierohstoffs, die geologisch nachgewiesen sind, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewonnen werden können, weil man neue und teure Technik benötigt; andererseits jene Mengen, die noch nicht nachgewiesen wurden, aber in einem Gebiet aufgrund der geologischen Charakteristika zu erwarten sind. Die Übergänge zwischen Reserve und Ressource sind manchmal fließend. So ist der Abbau von Ölsanden in Kanada das jüngste Beispiel für die Entwicklung von Ressourcen zu Reserven. Noch vor einigen Jahren war es nicht möglich, diese wirtschaftlich zu erschließen. Heute steht Kanada dank der Ölsandvorkommen in der Liste der Länder mit den größten Reserven weit oben. Da die Vorkommen mit neuer und aufwendiger Technik gefördert werden, gelten sie aber nach wie vor als nichtkonventionell.

Reichweite: Der Begriff Reichweite wird häufig verwendet, um zu verdeutlichen, wie viele Jahre ein Rohstoff noch verfügbar ist. Eine solche Angabe ist allerdings sehr unsicher, da niemand genau weiß, wie sich der Rohstoffbedarf künftig entwickeln wird. In der Diskussion um die Endlichkeit der Rohstoffe wird zudem nur selten definiert, ob die Reichweite jenen Zeitpunkt bezeichnet, an dem alle Lager erschöpft sind, oder jenen Zeitpunkt, an dem nicht mehr alle Bedürfnisse befriedigt werden können – beispielsweise wenn ein Mangel an Treibstoff herrscht. Fachleute verwenden daher meist den klarer definierten Begriff der statischen Reichweite.

Statische Reichweite: Die statische Reichweite ist das Verhältnis der Reserven oder der Ressourcen zur weltweiten Jahresförderung. Das Ergebnis ist eine Zahl, die angibt, für wie viele Jahre der Rohstoff bei gleichbleibendem Verbrauch und fixen Reserven beziehungsweise Ressourcen, also in einem theoretisch statischen Szenario, noch reichen wird. Da sich die Fördermenge und vor allem der Verbrauch eines Rohstoffs aber ständig ändern, ist selbst die statische Reichweite eine unsichere Größe. Künftige politische und wirtschaftliche Entwicklungen, die den weltweiten Verbrauch wie auch die Ölförderung und Ölmärkte beeinflussen können, sind nicht genau vorhersehbar. Wie sich in den vergangenen Jahren gezeigt hat, wurden außerdem immer wieder neue große Rohstoffvorkommen entdeckt, die wiederum die statische Reichweite beeinflusst haben. Die statische Reichweite kann daher lediglich ein momentanes Bild der Rohstoffwirtschaft liefern.



1.7 > Dank der Ölsande verfügt Kanada über erhebliche Ölreserven. Allerdings hat der Tagebau dort große Waldgebiete zerstört.



1.8 > Stellt man die Reserven und Ressourcen dem von der IEA bis zum Jahr 2035 aufsummierten Gesamtverbrauch gegenüber, wird deutlich, dass vor allem die Kohle noch lange Zeit in ausreichender Menge verfügbar sein wird. Die Ölreserven hingegen werden Mitte dieses Jahrhunderts bereits stark ausgeschöpft sein. Zwar kann der Ölbedarf weiter gedeckt werden, allerdings wird man in absehbarer Zeit auch auf nicht-

konventionelle Ressourcen zurückgreifen müssen. Weil dafür neue und anspruchsvolle Technik eingesetzt werden muss, dürfte sich das Öl deutlich verteuern. Beim Gas ist die Situation etwas entspannter, da der Verbrauch geringer und die Menge der konventionellen Ressourcen größer ist. Allerdings erwarten Experten, dass der Erdgasverbrauch künftig stark zunehmen könnte.

Konventionell und nichtkonventionell

Fachleute unterscheiden konventionelle von nichtkonventionellen Reserven und Ressourcen. Konventionelle Lagerstätten können mit herkömmlicher Technik erschlossen und ausgebeutet werden. Die Förderung nichtkonventioneller Reserven und Ressourcen hingegen benötigt neue, technisch anspruchsvolle und daher teure Fördertechnologien. Die Schiefergasvorkommen in den USA sind ein Beispiel für eine nichtkonventionelle Ressource.

Wie lange reichen die Rohstoffe?

In den vergangenen Jahrzehnten wurde immer wieder diskutiert, wie lange die Vorräte an fossilen Energieträgern noch reichen werden. Man befürchtete, dass vor allem das Öl knapp werden könnte. Dieser Fall ist bis heute nicht eingetreten. Weltweit steht derzeit noch genug Öl zur Verfügung, um auch den wachsenden Bedarf zu decken. Das liegt vor allem daran, dass man dank besserer Technik immer wieder neue Öllagerstätten an Land und im Meer entdeckt und außerdem Offshore-Vorkommen in immer größeren Wassertiefen erschließen kann. Ferner machen es neue Fördertechnologien möglich, mehr Öl aus einer Lagerstätte herauszupumpen als früher. Zum Teil werden stillgelegte Lagerstätten wieder geöffnet, um auch noch das restliche Öl herauszuholen, das man in der Vergangenheit nicht fördern konnte.

Um die künftige Versorgungssituation einzuschätzen, versuchen verschiedene Wissenschaftler und Ölkonzerne, die Rohstoffnachfrage in den nächsten Jahrzehnten mithil-

fe von Energieszenarien abzuschätzen. Derartige Szenarien liefert unter anderem regelmäßig die IEA. Die Ergebnisse können den aktuellen Schätzungen der Reserven und Ressourcen gegenübergestellt werden.

Es gibt noch genügend Öl

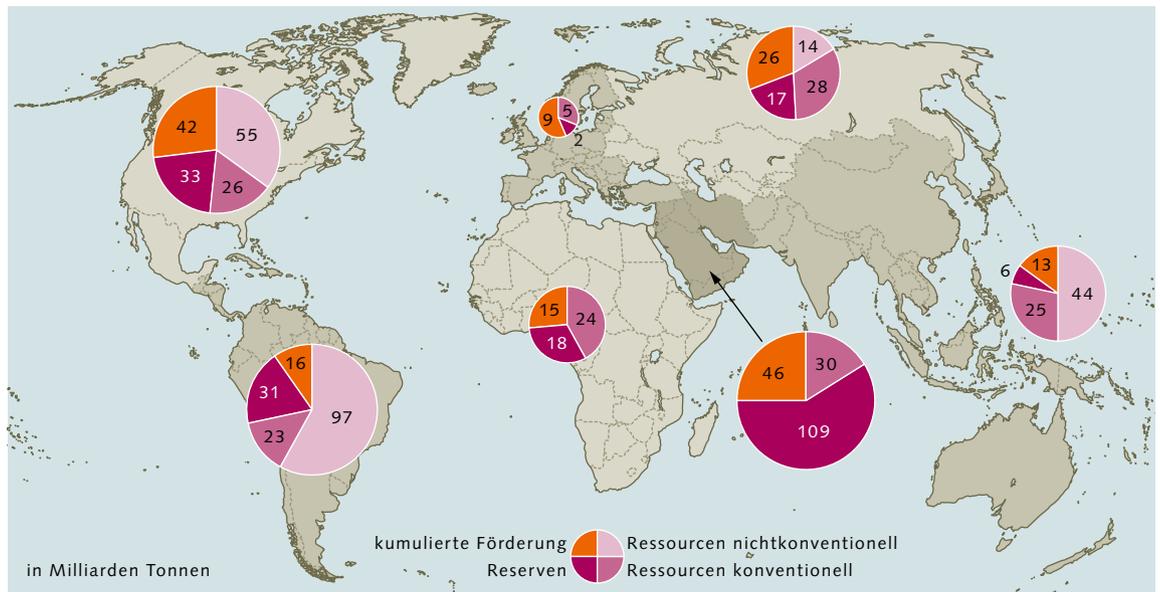
Insgesamt umfassten die bekannten Ölreserven und -ressourcen im Jahr 2011 rund 585 Milliarden Tonnen. Davon waren 258 Milliarden Tonnen nichtkonventionelles Erdöl. Dabei sind die Ölvorräte weltweit sehr unterschiedlich verteilt. Allein auf die in der Organisation der Erdöl exportierenden Länder (OPEC) versammelten Staaten, zum Beispiel Irak, Iran, Kuwait, Saudi-Arabien oder Venezuela, entfallen fast 50 Prozent der Ölreserven und -ressourcen. Die Regionen Australasien, Afrika und Europa hingegen bringen es zusammen nur auf etwa 20 Prozent.

Angesichts der Größe der derzeitigen Ölreserven und -ressourcen wird deutlich, dass in den kommenden Jahren aus geologischer Sicht auch bei einem moderaten Anstieg

1.9 > LNG-Tanker sind Spezialschiffe, die Flüssigerdgas transportieren und aufgrund ihrer charakteristischen kugelförmigen Tanks schon von Weitem erkennbar sind.



1.10 > Die Ölreserven und -ressourcen sind weltweit ungleich verteilt. Die wichtigste Region ist der Nahe Osten mit der Arabischen Halbinsel. 2011 standen einem Verbrauch von etwa 4 Milliarden Tonnen Öl Vorräte in Höhe von 585 Milliarden Tonnen gegenüber. Die kumulierte Förderung verdeutlicht, wie viel Öl in den verschiedenen Regionen bereits aus Lagerstätten gewonnen wurde.



des Verbrauchs weltweit ausreichend Öl zur Verfügung stehen wird. Ob dieser Rohstoff zukünftig aber immer dann in ausreichender Menge verfügbar gemacht werden kann, wenn er benötigt wird, kann nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden. In jedem Fall konnte bis heute der Bedarf an Erdöl durch entsprechende Förderung gedeckt werden.

Manche Kritiker hingegen hatten schon mehrfach den sogenannten Peak Oil vorhergesagt. Mit diesem Begriff bezeichnet man den Punkt, an dem die weltweite jährliche Ölfördermenge ihren historischen Höchststand erreicht, den historischen Scheitelpunkt der weltweiten Ölförderung. Nach dieser Definition schrumpft die Ölförderung von diesem Zeitpunkt an. Da aber immer wieder neue Ölvorkommen entdeckt und zudem die Fördertechniken verbessert wurden, ist die Fördermenge bis heute weltweit gewachsen.

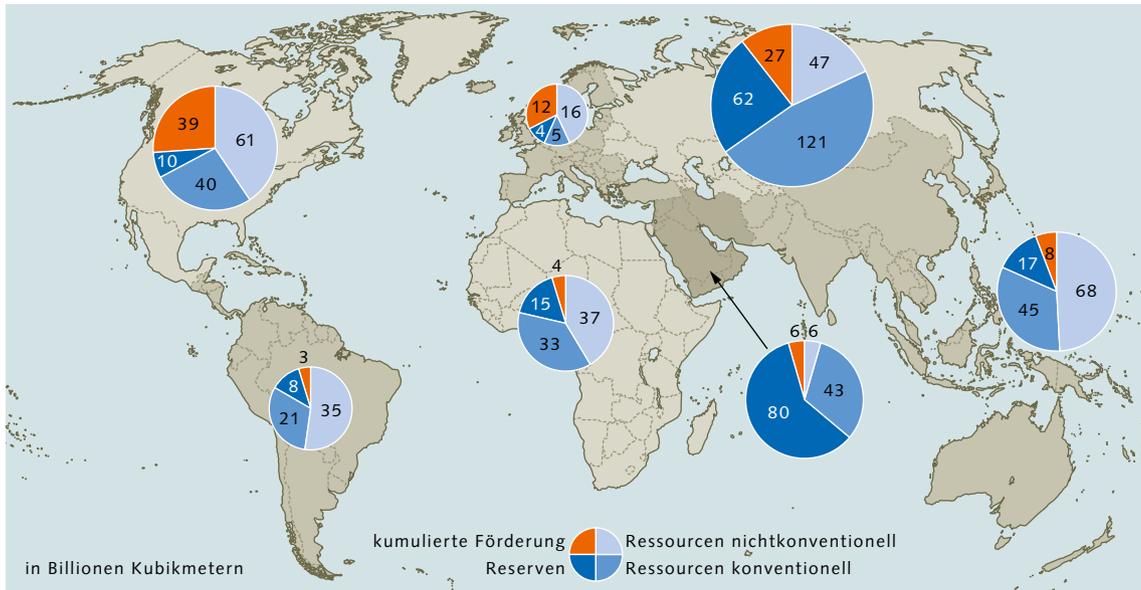
Für die folgenden Jahre erwarten einige Experten heute ein Peakplateau, also eine über eine längere Phase gleichbleibend hohe Fördermenge. Allerdings wird der Ölpreis weiter steigen, da zunehmend nichtkonventionelle Lagerstätten mit hohem technischem Aufwand erschlossen werden. Dazu zählen Ölsande, die in großem Stil in Kanada abgebaut werden, sowie Schieferöl, das in kaum durchlässigen Erdschichten lagert und deshalb nur mit hohem technischem Aufwand gefördert werden kann.

Auch die Ölförderung in immer größeren Meerestiefen wird den Ölpreis weiter nach oben treiben. So gehen Fachleute davon aus, dass der Anteil des Erdöls, das aus Wassertiefen von mehr als 200 Metern gefördert wird, bis zum Jahr 2015 auf 12 Prozent gestiegen sein wird. 2001 betrug er nur 2 Prozent.

Wann die globale Ölfördermenge sinken oder sich das Öl tatsächlich verknappen wird, ist heute schwer zu sagen. Bis 2035 wird dieser Punkt bei konsequenter Erschließung sämtlicher Ressourcen vermutlich noch nicht erreicht sein. Einzelne Staaten haben ihren Peak Oil inzwischen aber durchaus erreicht, Großbritannien zum Beispiel bereits 1999.

Fracking – Chancen und Risiken

Insgesamt umfassten die Gasreserven und -ressourcen 2011 rund 772 Billionen Kubikmeter Erdgas, das rund 230-Fache des Weltgasverbrauchs des Jahres 2011. Dabei machen die Ressourcen mit 577 Billionen Kubikmetern den Löwenanteil aus. 60 Prozent der Ressourcen wiederum sind nichtkonventionell. Ein Beispiel sind Kohleflözgase, die in Kohleschichten lagern und heute bereits in einigen Ländern wie Australien mit nichtherkömmlicher Technik gefördert werden können. Von besonderem Interesse sind derzeit die großen nichtkonventionellen Schie-



1.11 > Auch Erdgas findet man weltweit in verschiedenen Regionen in unterschiedlicher Menge. Die Mengen an Gashydraten im Meeresboden wurden aufgrund unsicherer Schätzungen nicht berücksichtigt.

fergasressourcen in den USA. Dabei handelt es sich um Erdgas, das in kaum durchlässigen Bodenschichten gefangen ist. Zwar sind diese Böden porös, sodass sie Erdgas speichern können. Allerdings sind die Poren voneinander isoliert und nicht wie in konventionellen Lagerstätten durch sogenannte Porenhäse miteinander verbunden. In den USA hat man vor einigen Jahren begonnen, diese Gasvorräte zu erschließen, indem man in den gashaltigen Gesteinen künstliche Risse erzeugt. Dazu wird Wasser mit chemischen Zusätzen unter hohem Druck in den Boden gepresst. Hydraulic Fracturing (hydraulisches Aufbrechen) oder kurz: Fracking wird diese vergleichsweise neue Methode zur Erdgasförderung aus Schiefergas genannt.

Das Fracking hat in Amerika eine Art Schiefergasrevolution ausgelöst. So wird sich die USA in den nächsten Jahren vermutlich gänzlich von Erdgasimporten unabhängig machen können. Die Schiefergasressourcen der USA werden derzeit auf fast 14 Billionen Kubikmeter geschätzt. Weltweit dürften es rund 157 Billionen Kubikmeter sein. Noch aber ist das Wissen über die Ausdehnung der weltweiten Schiefergaslagerstätten lückenhaft. Insofern sind diese Schätzungen gleichermaßen relativ unsicher. Auch ist das Fracking zum Teil stark umstritten. Kritiker fürchten, dass die Chemikalien aus Fracking-Bohrungen entweichen und das Grundwasser verschmutzen könnten.

Die Zukunft der Öl- und Gasförderung im Meer

Obwohl heute noch das meiste Gas und Öl an Land gefördert wird, ist ihr Anteil aus dem Meer (Offshore-Gas und -Öl) beachtlich. So trägt Offshore-Öl mit 37 Prozent zur weltweiten Ölförderung bei. Offshore-Gas hat einen Anteil von 28 Prozent an der globalen Gasförderung – Tendenz steigend. Kohle wird bis heute nicht im Meer abgebaut.

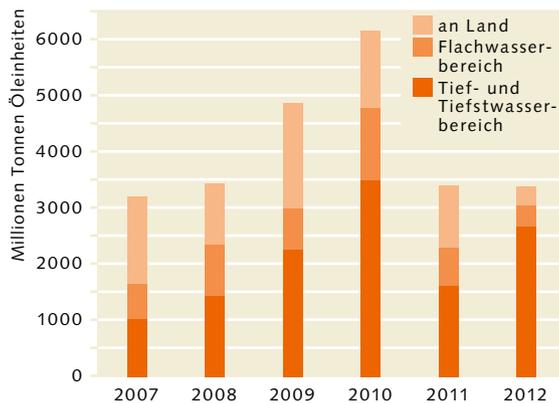
Lange blieb die Erdgas- und Erdölförderung auf Flachwasserbereiche wie etwa die Nordsee oder küstennahe Gebiete der USA beschränkt. Da aber zahlreiche alte Lagerstätten versiegten, sind die Konzerne inzwischen in die Tiefe vorgedrungen. Dabei unterscheidet man 3 verschiedene Tiefenbereiche:

- den Flachwasserbereich, der bis in eine Tiefe von etwa 400 Metern reicht;
- den Tiefwasserbereich, der bis in eine Tiefe von etwa 1500 Metern reicht;
- den Tiefstwasserbereich, der unterhalb von etwa 1500 Metern liegt.

Dank neuer geophysikalischer Erkundungsverfahren sind Wissenschaftler heute in der Lage, den Meeresboden und andere Bodenschichten bis in eine Tiefe von 12 Kilome-

tern unter dem Meeresboden in hoher Auflösung nach Gas- und Öllagerstätten abzusuchen. Dabei wurden in den vergangenen Jahren immer wieder neue große Lagerstätten entdeckt oder neu vermessen. Aktuelle Untersuchungen haben ergeben, dass zwischen 2007 und 2012 481 größere Felder im Tief- und Tiefstwasserbereich neu entdeckt worden sind. Das sind mehr als 50 Prozent der insgesamt neu entdeckten größeren Offshore-Felder, also jener Felder, die eine Größe von mindestens 170 Milliarden Barrel Öleinheiten haben, was in etwa 23 800 Millionen Tonnen Öleinheiten entspricht. Der Tief- und Tiefstwasserbereich wird also immer wichtiger. Interessant ist auch, dass die neu entdeckten Offshore-Felder in der Regel 10-mal größer als neu entdeckte Felder an Land sind, was die Tief- und Tiefstwasserförderung trotz höherer Kosten attraktiv macht. Betrachtet man die derzeitige Öl- und Gasproduktion weltweit, ist der Anteil der Förderung unterhalb von 400 Metern mit rund 7 Prozent aber noch relativ gering. Das liegt nicht zuletzt daran, dass derzeit nur 38 Prozent der bekannten Tief- und Tiefstwasserfelder in Betrieb sind. Die meisten Gebiete werden derzeit noch im Detail erkundet. In einigen Fällen wurden erste Probebohrungen durchgeführt.

Viele Experten sind sich darin einig, dass die Tief- und Tiefstwasserbereiche die letzten Bastionen der Ölgewinnung sind. Da viele ehemals ertragreiche Felder an Land und im Flachwasser bereits weitgehend ausgebeutet sind, gibt es heute und in den kommenden Jahren kaum mehr



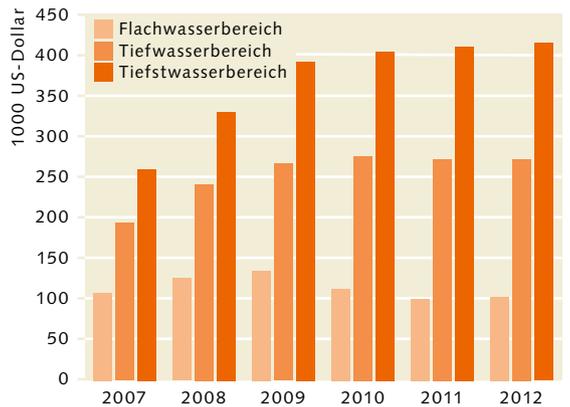
1.12 > Betrachtet man die Volumina der zwischen 2007 und 2012 neu entdeckten Felder von Offshore-Öl und -Gas, wird deutlich, dass die Rohstoffmengen in einer Tiefe unterhalb von etwa 400 Metern den größten Anteil haben.

eine Alternative. Wann sich die Förderung lohnt, hängt letztlich davon ab, wie hoch der Ölpreis ist. Grundsätzlich aber gilt: Je tiefer das Wasser ist, desto höher sind die Kosten der Förderung.

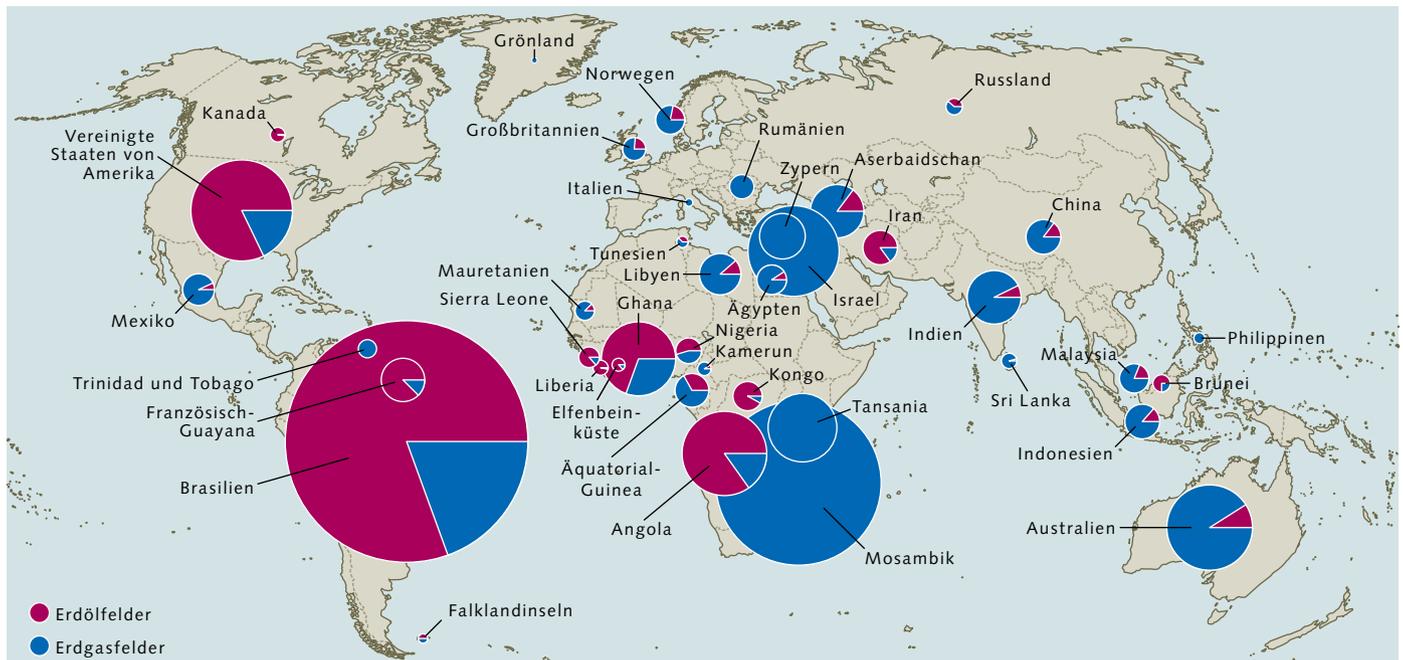
Erschlossen werden im Meer heute fast ausschließlich konventionelle Ölvorkommen. Sollte der Ölpreis in den kommenden Jahrzehnten aber weiter deutlich steigen, könnte es künftig vielleicht sogar interessant sein, nicht-konventionelle Vorkommen wie etwa Schieferöl nicht nur an Land, sondern auch im Meer auszubeuten. Noch ist man davon aber weit entfernt.

Vielversprechende Meeresgebiete

Bedeutende Neuentdeckungen im Meer wurden seit 2007 unter anderem im Santos-Becken vor Brasilien gemacht. Hierbei handelt es sich um mehrere große Gas- und Ölvorkommen von bis zu 1 Milliarde Tonnen Erdöl und 1 Milliarde Kubikmeter Erdgas, die unter einer mächtigen Salzschieicht (pre-salt layer) mehrere Tausend Meter tief im Meeresboden verborgen sind. Lagerstätten dieser Größe könnten den weltweiten Gas- und Ölbedarf für mehrere Monate decken. Diese Vorkommen sind bei geophysikalischen Untersuchungen des Bodens lange unentdeckt geblieben, weil die Salzschieichten die Signale der Messgeräte abgeschirmt haben. Dank eines verbesserten Verfahrens konnten die Vorkommen vor wenigen Jahren aufgespürt werden.



1.13 > Je tiefer das Wasser, desto höher die Kosten: Im Tiefstwasserbereich unterhalb von etwa 1500 Metern war ein Bohrtag im Jahr 2012 rund 4-mal so teuer wie im Flachwasserbereich.



Inzwischen konnte man auch auf der anderen Seite des Atlantiks im Kwanza-Becken vor Angola Ölvorkommen unter einer 2000 Meter mächtigen Salzschieht nachweisen. Im Schwarzen Meer und im Kaspischen Meer wurden in den vergangenen Jahren ebenfalls neue Gas- und Ölfelder unterhalb von 400 Metern entdeckt beziehungsweise erschlossen. Damit sind auch Staaten wie der Iran, Rumänien und Russland in den Tiefwasserbereich vorgestoßen.

Wichtige neue Ölfelder wurden im Golf von Mexiko und vor Ghana entdeckt sowie auch vor Französisch-Guayana. Motiviert durch diese Funde, will man hier jetzt nach weiteren Vorkommen in ähnlichen Bodenschichten vor den Küsten der beiden Nachbarstaaten Suriname und Brasilien suchen. Heute gelten die Tief- und Tiefwasserregionen im Golf von Mexiko und im Atlantik vor Südamerika und Westafrika als am vielversprechendsten.

Bedeutende Gasfelder wurden zwischen 2007 und 2012 vor allem vor Mosambik und Tansania sowie im Mittelmeer vor Israel und Zypern entdeckt. Beide Gebiete sind so ergiebig, dass sie die Gasversorgung der Regionen verändern werden. Israel beispielsweise wird sich damit für lange Zeit von Gasimporten aus den arabischen Nachbarstaaten unabhängig machen können.

Sonderfall Arktis

Mit dem durch den Klimawandel verursachten Schmelzen des arktischen Meereises wächst die Hoffnung der arktischen Nationen, künftig die Erdgas- und Erdölvorräte in der Nordpolarregion ausbeuten zu können. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass dort tatsächlich beträchtliche Vorkommen zu finden sind. So wird vermutet, dass in den Meeresgebieten nördlich des Polarkreises etwa 30 Prozent der bislang noch unentdeckten Gasmenge und 13 Prozent des unentdeckten Öls ruhen. Dabei sollen die beträchtlichen Gasvorräte vor allem in den russischen Gewässern liegen.

Ob und wann eine Förderung in der Arktis beginnt, kann derzeit aber noch keiner sagen, nicht zuletzt weil noch eine Reihe rechtlicher Fragen zu klären ist. So ist in den vergangenen Jahren zwischen den Anrainerstaaten ein Streit darüber entbrannt, welchem Hoheitsgebiet der arktische Meeresboden tatsächlich zuzurechnen ist. Die Anrainer versprechen sich große Rohstoffgewinne, werden aber noch warten müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Förderung in diesen Gebieten derzeit nicht wirtschaftlich ist, da man sie nur mit aufwendigen und teuren Eisbrechereinsätzen erkunden kann.

1.14 > Die bedeutendsten Neuentdeckungen von Gas- und Ölfeldern in Wassertiefen von mehr als 400 Metern wurden in den vergangenen Jahren vor allem im Südatlantik und vor Westafrika gemacht.

Erdgas und Erdöl gewinnen

> Erdgas und Erdöl sind im Laufe der Erdgeschichte aus den Überresten von Meeresalgen und Landpflanzen entstanden. Diese konnten sich in bestimmten Gesteinsschichten zu großen Vorkommen ansammeln. Mit moderner Bohrtechnik und riesigen Plattformen holt man die Rohstoffe heute aus immer größeren Tiefen. Sogar auf dem Meeresboden werden Förderanlagen errichtet.

Millionen Jahre alte Biomasse

Erdgas und Erdöl sind in mehreren Hundert Millionen Jahren aus abgestorbenem biologischem Material entstanden, das sich am Grund von Meeren, Seen und Sümpfen angesammelt hatte. Erdöl bildete sich insbesondere aus abgestorbenen Mikroalgen, dem **Phytoplankton**, Kohle und Erdgas hingegen vor allem aus Landpflanzen. Vorwiegend in warmen Regionen mit üppiger Vegetation oder starkem Algenwachstum lagerte sich besonders viel Biomasse ab. Für gewöhnlich verwest abgestorbene Biomasse im Wasser. Sie wird vor allem von Bakterien zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut. Dabei wird Sauerstoff verbraucht. Sinkt sehr viel Biomasse herab, wird der Sauerstoff durch die Bakterien vollständig aufgezehrt. Es entstehen sauerstofffreie Zonen, in denen keine Verwesung mehr stattfindet. So konnten sich im Laufe der Zeit mächtige Biomassepakete von mehreren Hundert oder Tausend Meter Dicke am Meeresboden ablagern. Ob sich aus der Biomasse nun Erdgas oder Erdöl entwickelte, hing insbesondere von den Temperaturen in der Tiefe ab.

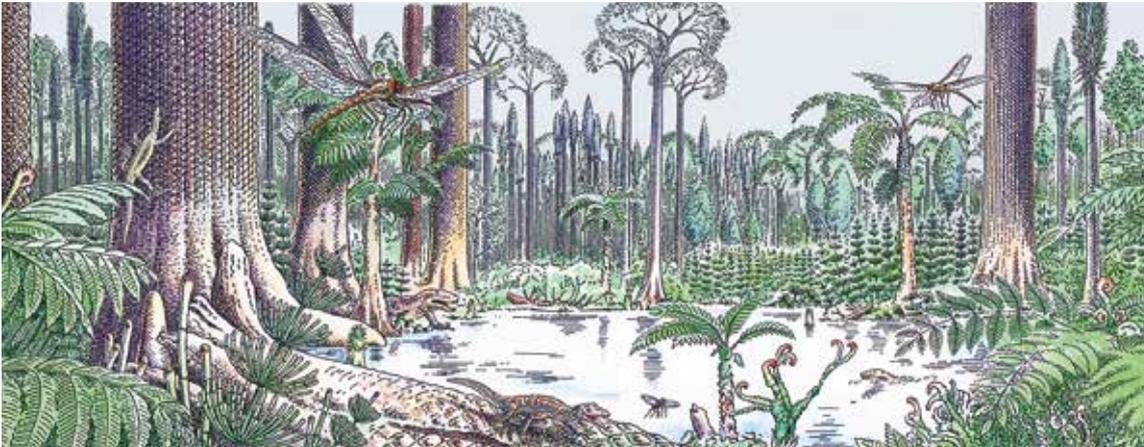
Plankton verkocht zu Öl

Erdöl bildete sich in mehreren aufeinanderfolgenden Prozessen. Zunächst häufte sich das Phytoplankton am Meeresboden an. Zusammen mit feinen Gesteins- und Tonpartikeln, die aus dem Gebirge und aus dem Flachland ins Meer gespült wurden, ergab diese Algenbiomasse einen Faulschlamm. In vielen Millionen Jahren lagerte sich am Meeresboden so viel Faulschlamm ab, dass er schließlich durch sein enormes Gewicht nach und nach zu sogenannten Tonsteinen und schließlich zu Tonschiefer zusammengepresst und weiter verfestigt wurde. In diesen porösen Tonschieferschichten in 2000 bis 4000 Meter Tiefe findet teilweise auch heute noch bei Temperaturen zwischen 65

und 120 Grad Celsius die Umwandlung der Biomasse in Erdöl statt. Diesen Temperaturbereich bezeichnet man als Erdölfenster. In diesem verkocht die Biomasse wie in einem Chemielabor zu diversen chemischen Verbindungen, die ausschließlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen und deshalb Kohlenwasserstoffe genannt werden. Erdöl ist also eine Mischung aus vielen Hundert verschiedenen Substanzen, die man in Raffinerien zunächst voneinander trennt oder in kleinere Molekülketten aufspaltet. Dieses Aufspalten wird als Cracking bezeichnet. So entstehen aus dem Erdöl nicht nur Treibstoffe wie etwa Benzin oder Diesel, sondern auch andere Produkte wie beispielsweise die Gase Ethylen und Propylen. Diese nur wenige Atome großen Kohlenwasserstoffmoleküle nutzt man unter anderem für die Herstellung von Kunststoffen.

Gesteine wie der Tonschiefer, in denen sich Erdöl bildet, werden Erdölmuttergesteine genannt. Sie enthalten bis zu 20 Prozent organisches Material. Innerhalb von Jahrmillionen wurden die Muttergesteine durch die auf ihnen lagernden Sediment- und Gesteinsschichten nach und nach zusammengepresst. Dadurch bildete sich Erdöl. Je mehr Erdöl entstand, desto mehr entwich davon aus dem Muttergestein und stieg langsam auf. In manchen Gegenden gelangte es bis an die Oberfläche. In der Nähe der norddeutschen Stadt Celle etwa bildeten sich so auf natürliche Weise sogenannte Teerkuhlen, deren schwarze Flüssigkeit als Lampenöl, Schmierstoff und sogar als Heilmittel genutzt wurde.

Erdöllagerstätten entstanden immer dann, wenn das Öl durch undurchlässige Schichten wie etwa Salz- und Tonschichten am Aufsteigen gehindert wurde. Befand sich unter diesen Schichten ein poröses, speicherfähiges Gestein, zum Beispiel Sand- oder Kalkstein, konnte sich das Öl darin wie in einem Schwamm sammeln. Fachleute nennen derartige Formationen im Untergrund Fallen-



1.15 > Vor 300 Millionen Jahren gab es ausgedehnte Bärlapp- und Schachtelhalmwälder. Die Pflanzen waren mehrere Meter hoch und damit deutlich größer als heute. Aus ihnen entstanden Kohle und Erdgas.

strukturen. Die porösen Gesteine enthalten aber nicht nur Öl und andere Kohlenwasserstoffe, sondern auch große Mengen an sogenanntem Porenwasser, das bei der Förderung vom Öl abgetrennt werden muss.

Da sich die Kontinente im Laufe von vielen Millionen Jahren durch die Kontinentalwanderung bewegt haben, gibt es die alten Meere, in denen sich die Tonschiefer gebildet haben, heute nicht mehr. Vor rund 120 Millionen Jahren etwa begannen Südamerika und Afrika auseinanderzubrechen. Dabei entstand zunächst ein kleines, von Land umgebenes tropisches Meer, in dem sich sehr viel Biomasse abgelagerte. Dieses Meer weitete sich dann zum Südatlantik aus. Die alten Sedimente des alten tropischen Meeres liegen heute vor den Küsten Südamerikas und auch vor denen Westafrikas.

Torfschicht auf Torfschicht

Erdgas entwickelte sich in der Regel aus Landpflanzen, die einst in flachen Küstengebieten oder in küstennahen Sümpfen unter subtropischem und tropischem Klima wuchsen. In den Sümpfen bildete sich zunächst meist Torf. Da der Meeresspiegel im Verlauf von Jahrtausenden steigt und fällt, wurden diese Feuchtgebiete immer wieder überspült. Feine Sand- und Tonpartikel, die vom Land ins Meer getragen wurden, lagerten sich dann auf den alten Torfschichten ab. Zog sich das Wasser wieder zurück, weil der Meeresspiegel sank, siedelten sich in den Gebieten wieder Landpflanzen an, sodass eine neue Torflage entstehen konnte. Mit dem Steigen und Sinken des Meeresspie-

gels entstanden in Millionen Jahren baumkuchenartige Sedimente, in denen sich sandige und tonige Schichten mit mächtigen Torflagen abwechselten. Ideale Voraussetzungen für die Bildung von Torf gab es in großen Teilen Mittel- und Nordeuropas und in Nordamerika vor 290 bis 315 Millionen Jahren. Diese Gebiete lagen damals nahe am Äquator, also im warmen tropischen Bereich, und waren reich an Vegetation. Erst später drifteten diese Landesteile mehrere Tausend Kilometer nach Norden an ihre jetzige Position.

Auch die baumkuchenartigen Torf-Ton-Schichten wurden mit der Zeit von neuen Sedimenten überlagert und durch deren enormes Gewicht zusammengepresst. Allerdings entstand aus den alten Torfschichten kein Öl, sondern zunächst Braunkohle und später Steinkohle. In einer Tiefe von 4000 bis 6000 Metern und bei Temperaturen zwischen 120 und 180 Grad Celsius entstand in der Kohle während vieler Millionen Jahre Erdgas. Damit sich Erdgas bilden kann, sind also höhere Temperaturen als bei der Erdölentstehung nötig.

Erdgas besteht in der Regel zu etwa 90 Prozent aus Methan. Hinzu kommen andere gasförmige Kohlenwasserstoffe, zum Beispiel Äthan, Propan und Butan, sowie nicht brennbare Gase wie etwa Kohlendioxid und Stickstoff. Eine weitere Komponente ist Schwefelwasserstoff, der aber aus dem Erdgas entfernt werden muss, bevor man dieses nutzen kann. Denn Schwefelwasserstoff kann sich bei der Gasverbrennung in Säure umwandeln, die zu Korrosion in Kraftwerken und auch in Heizanlagen führen kann.

Torf

Als Torf bezeichnet man Böden, die mehr als 30 Prozent organisches Material enthalten. Dabei handelt es sich um teilweise vermoderte Pflanzenreste, die im sauerstofffreien, stehenden Wasser der Sümpfe nicht weiter zersetzt werden.

Erdgas mit einem besonders hohen Anteil an Schwefelwasserstoff oder Kohlenstoffdioxid nennt man Sauerogas. Will man dieses nutzen, muss es zuvor aufwendig gereinigt werden. Auch das Erdgas wandert nach und nach aus dem Muttergestein heraus. Wird es nicht durch dichte Gesteinsschichten aufgehalten, kann es wie das Erdöl bis zur Erdoberfläche aufsteigen. Durch aufsteigendes Gas und **Kondensat**, das sich vermutlich durch Blitzeinschläge entzündet hat, sind die „Ewigen Feuer“ im Iran entstanden. Weltweit gibt es viele Orte, wo solche durch unterirdisches Gas gespeisten Feuer immer noch brennen. Einige entwickelten sich zu heiligen Stätten.

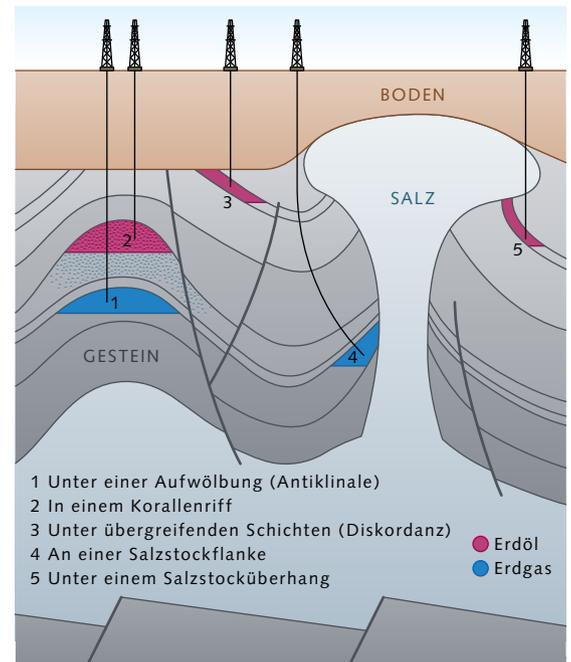
Sofern im Untergrund Fallenstrukturen vorhanden waren, konnte sich das Erdgas genau wie das Erdöl zu Lagerstätten ansammeln. Grundsätzlich spricht man nur dann von einer Lagerstätte, wenn sie groß genug und ihr Gestein zudem so durchlässig ist, dass sich die Kohlenwasserstoffe wirtschaftlich fördern lassen. Das gilt für Gas und Öl gleichermaßen. Gas- oder Ölsammlungen, die zu klein für eine wirtschaftlich relevante Förderung sind, sind allerdings weit häufiger zu finden.

Erdgas und Erdöl in der Falle

Die Experten unterscheiden verschiedene Typen von Lagerstätten, in denen sich große Mengen an Erdgas oder Erdöl angesammelt haben. Typische Lagerstätten sind unter anderem:

ANTIKLINALE: Eine Antiklinale ist eine Aufwölbung von Gesteinsschichten, eine Art Hügel im Untergrund. Sie entsteht, wenn dichte Gesteinsschichten durch die Bewegung der Erdkruste seitlich zusammengestaucht werden. Sofern die Antiklinale aus undurchlässigem Gestein besteht, können sich dort aufsteigendes Erdgas und Erdöl wie unter einer Käseglocke sammeln.

SALZSTOCKFLANKE: Salzstöcke sind große Ansammlungen von festem Steinsalz im Erdboden, die mehrere Tausend Meter mächtig sein können. Endet eine undurchlässige Gesteinsschicht, eine Fallenstruktur, an der Flanke eines Salzstocks, so sind Erdgas und Erdöl zwischen Gestein und Flanke gefangen, da auch das Salz undurchlässig ist.



1.16 > Gas und Öl sammeln sich in verschiedenen Arten von Lagerstätten im Untergrund.

DISKORDANZ: Bei einer Diskordanz liegen Gesteinsschichten schräg bzw. verwinkelt aufeinander. Diskordanz entstehen durch Hebungen, Senkungen oder Stauungen von Gesteinspaketen, die später von jüngeren Sedimenten überlagert werden. Sind diese Sedimentschichten undurchlässig, können sich in den darunterliegenden Gesteinspaketen aufsteigendes Erdgas und Erdöl sammeln.

KORALLENRIFFE: Erdgas und Erdöl sammeln sich oftmals in porösem Kalkstein, der sich aus alten Korallenriffen gebildet hat.

SALZSTOCKÜBERHANG: Manche Salzstöcke sind oben pilzhutartig verbreitert und bilden eine Art Schirm, den man als Überhang bezeichnet. Unter diesem können sich Erdgas und Erdöl sammeln. Salzstocküberhänge entstehen meist aufgrund des enormen Drucks im Boden. Salz steigt auf, da es eine geringere Dichte als die auf ihm lagernden Schichten hat. Dabei wölbt es sich zu Domen oder den pilzhutartigen Überhängen auf. Diese Bewegungen bezeichnet man als Salztekonik.

Die Suche nach Erdgas und Erdöl

Dass es bis heute trotz eines weltweit steigenden Energiebedarfs ausreichend Erdgas und Erdöl gibt, liegt unter anderem daran, dass in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder neue Lagerstätten an Land und im Meer entdeckt worden sind, nicht zuletzt weil sich die Verfahren, mit denen sich Lagerstätten aufspüren lassen, weiterentwickelt haben. Die Suche nach Rohstoffen umfasst die Prospektion und die Exploration. Mit Prospektion bezeichnet man die Suche nach noch unbekanntem Lagerstätten. Daran schließt sich die Exploration an, die genaue Untersuchung und Erschließung der gefundenen Lagerstätten und Rohstoffvorkommen. Hat man im Zuge der Exploration Vorkommen entdeckt, werden weitere Bohrungen durchgeführt, um die Größe und Ausdehnung der Lagerstätte einzuschätzen. Diese Phase wird als Bewertung bezeichnet. Ist die Lagerstätte ausreichend groß, beginnt man mit der Förderung.

Die Prospektion beginnt damit, herauszufinden, ob in einem bestimmten Gebiet überhaupt Erdgas und Erdöl zu erwarten sind. Dazu werden zunächst Daten über die tiefen Gesteinsschichten beziehungsweise zur erdgeschichtlichen Entwicklung des Areal gesammelt. Zum Einsatz kommen auch Computerprogramme, mit deren Hilfe man die Erdgeschichte des Gebiets nachspielt, sogenannte Beckenanalysen. Diese Programme simulieren die jahrtausendelange Sedimentation in den prähistorischen Meeresbecken und die Wandlung vom Sediment zum Gestein in der Tiefe. Simuliert wird auch die Bildung von Rissen, Fallenstrukturen und Salzstöcken sowie die Auswirkungen der Erdkrustenbewegungen etwa aufgrund der Kontinentalverschiebung.

Daran schließen sich ausführliche geophysikalische Untersuchungen an, mit denen der Untergrund wie ein Patient bei einer medizinischen Untersuchung durchleuchtet wird. Prinzipiell nutzt man an Land und im Meer die gleichen Verfahren. Für die Erkundung des Meeresbodens aber sind Flugzeug- und Schiffseinsätze und spezielle Geräte nötig. Wichtige geophysikalische Verfahren sind:

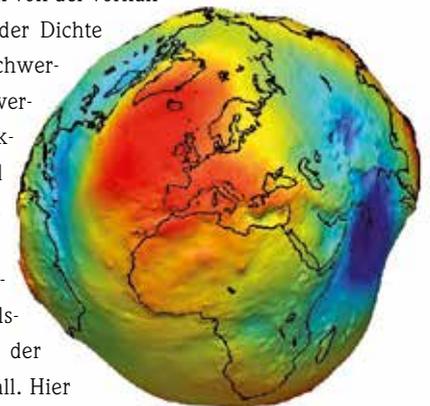
SEISMIK: Die Seismik ist das weltweit wichtigste Prospektionsverfahren. Die Methode funktioniert ähnlich wie die Ultraschalluntersuchung beim Arzt, bei der Ultra-

schallwellen von einem Schallkopf in den Körper geschickt werden und verschiedene Organe oder Knochen die Wellen unterschiedlich stark reflektieren. Aus diesem Reflexionsmuster erzeugt das Ultraschallgerät dann Bilder des Körperinneren. Bei der Seismik nun werden von Forschungsschiffen aus mit sogenannten Airguns akustische Wellen im Wasser erzeugt, die bis in den Erdboden dringen. Je nach Gesteinsart wandern sie unterschiedlich schnell. Im Untergrund werden die Wellen an den Gesteinsgrenzen reflektiert. Aus den Laufzeitunterschieden der Schallwellen können die Computer dann auf die Bodenbeschaffenheit schließen. Vor wenigen Jahrzehnten lieferte die Seismik nur einfache Schnitte durch den Untergrund. Heute kommt die moderne 3-D-Seismik zum Einsatz. Diese ist nicht zuletzt dank immer leistungsfähigerer Computer in der Lage, Bodenstrukturen und Lagerstätten auch räumlich darzustellen (Kapitel 3).

GRAVIMETRIE: Die Gravimetrie war eine der ersten geophysikalischen Techniken, die man bei der Suche nach Erdöl und Erdgas einsetzte. Die Methode macht sich die Schwerkraft (Gravitation) der Erde zunutze, die nicht an allen Punkten gleich stark ist, sondern von der vorhandenen Masse im Untergrund bzw. der Dichte des Gesteins abhängt. Mithilfe der Schwerkraftmessung kann man folglich verschiedene Gesteine oder Bodenstrukturen voneinander unterscheiden und damit auf mögliche Lagerstätten schließen. Allerdings muss der Unterschied zwischen den Gesteinen ausreichend groß sein. Das ist beispielsweise in den Erdschichten unter der Barentssee im Nordostatlantik der Fall. Hier gibt es große Salzstöcke, die eine wesentlich geringere Dichte als das umgebende Gestein haben. So lassen sich unter anderem Salzstockflanken und -überhänge entdecken. Die Schwerkraft wird mit Gravimetern gemessen, die auf Schiffen, Flugzeugen und seit etwa 10 Jahren auch auf Satelliten eingesetzt werden.

MAGNETIK: Die Erde besitzt ein Magnetfeld, das sich zwischen dem Nordpol und dem Südpol erstreckt. Dieses Magnetfeld ist sehr gleichmäßig. Allerdings können

1.17 > Die Schwerkraft der Erde ist an verschiedenen Punkten unterschiedlich groß. Sie hängt insbesondere von der Dichte des Gesteins ab. Mithilfe von Satelliten werden seit einigen Jahren sehr genaue Schwerkraftkarten erstellt. Gebiete mit großer Schwerkraft sind auf dieser Abbildung rot und leicht erhaben dargestellt. Regionen mit geringer Schwerkraft sind blau und als Vertiefung, als Delle, abgebildet. Fachleute bezeichnen die Erde als Gravitationskartoffel.



bestimmte Bodenstrukturen zu Abweichungen in diesem Magnetfeld führen, zu sogenannten magnetischen Anomalien, die messbar sind. Wie groß die Abweichungen sind, hängt unter anderem davon ab, wie stark der Untergrund magnetisiert ist. Diese Magnetisierung wiederum ist von den Eisenverbindungen abhängig, die im Untergrund enthalten sind: Magnetit, Maghemit und Hämatit. So ist Hämatit schwächer magnetisch als die beiden anderen Verbindungen. An einer Lagerstätte ist das Magnetfeld in der Regel schwächer, weil das Sedimentgestein, in dem Öl und Gas lagern, weniger magnetisch ist als das umgebende Gestein, beispielsweise vulkanisches Gestein. Magnetfeldmessungen werden meist von Flugzeugen aus mit hochempfindlichen Messgeräten gemacht. So lassen sich in kurzer Zeit große Flächen untersuchen.

ELEKTROMAGNETIK (Georadar): Bei elektromagnetischen Verfahren werden wie bei der Rundfunkantenne elektromagnetische Impulse, in diesem Fall Radarwellen, ausgesendet. Ähnlich wie die Schallwellen bei der Seismik werden die elektromagnetischen Signale von Bodenstrukturen verändert.

Hat man mit den geophysikalischen Methoden ein Meeresgebiet erkundet, schließen sich Explorationsbohrungen an, die meist von schwimmenden Bohranlagen, sogenann-

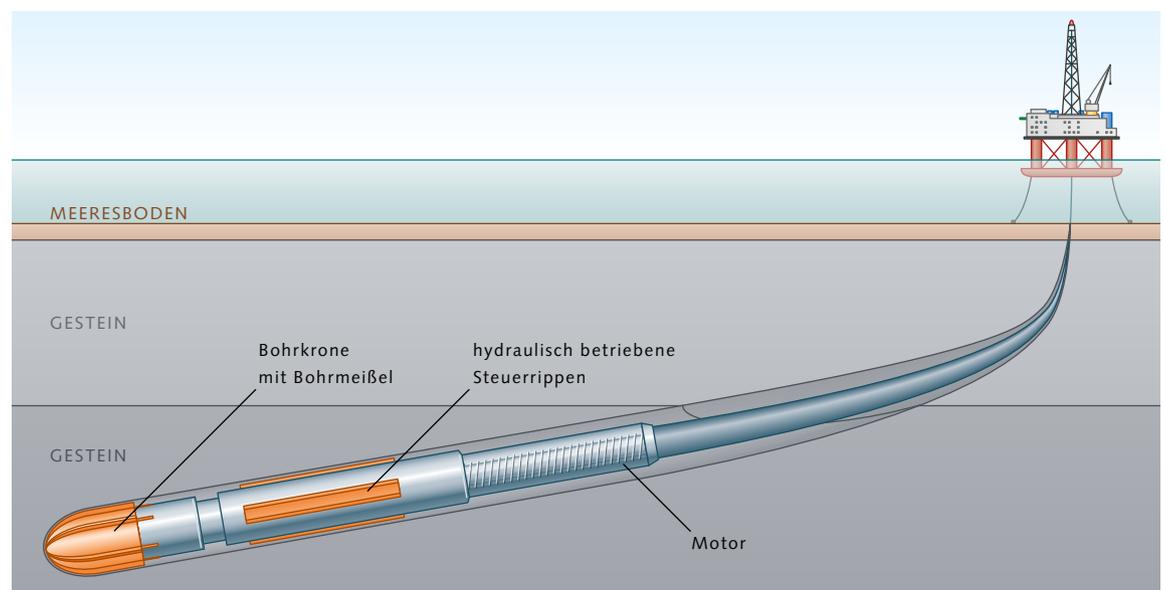
ten Halbtauchern, aus durchgeführt werden. Während des Bohrens wird das Bohrklein permanent von den Spezialisten an Bord untersucht. Von Interesse sind die Gesteinsart und das Alter sowie die Zusammensetzung der durchbohrten Schichten. Tonschiefer kann auf Muttergesteine hindeuten, Sandstein auf Lagerstätten. Die Überreste von Meeresorganismen wiederum, etwa die Kalkschalen von Meeresalgen, die zu bestimmten Zeiten und unter bestimmten Klimabedingungen gelebt haben, geben Hinweise darauf, wie alt die Gesteinsschichten sind.

Während des Bohrens wird außerdem ständig der Erdgas- und Kohlenwasserstoffgehalt des Bohrkleins gemessen. Gibt es konkrete Hinweise auf eine Lagerstätte, wird durch zusätzliche Bohrungen untersucht, wie groß die Lagerstätte ist, wie gut sich die Rohstoffe daraus fördern lassen und welche Qualität das Gas oder Öl hat. Erst wenn all diese Informationen vorliegen, kann die Förderung beginnen.

Lieber horizontal als senkrecht

Um Gas- und Ölvorkommen zu erschließen, müssen mehrere Tausend Meter mächtige Gesteinsschichten durchbohrt werden. Dafür benötigt man baumstammdicke Bohrmeißel, die mit großen Zähnen aus Hartmetall oder Keramik besetzt sind. Die Bohrmeißel zertrümmern das

1.18 > Dank der Richtbohrtechnik können von einer Plattform aus Lagerstätten in weitem Umkreis erschlossen werden.



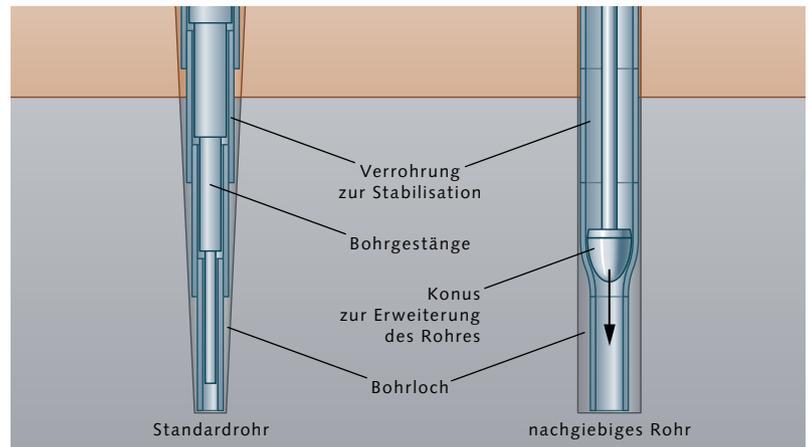
Gestein. Sie werden heute meist durch eine Turbine bewegt, die hinter dem Meißel sitzt. Diese Turbine wiederum wird durch Spülflüssigkeit in Rotation versetzt, die man unter hohem Druck ins Bohrloch einpresst. Diese Spülflüssigkeit transportiert auch das zerkleinerte Gestein ab. Sie steigt mit dem Bohrklein auf, wird auf der Bohranlage gereinigt und dann wieder in die Tiefe gepumpt. Um den Bohrmeißel in die Erde zu treiben, wird das Bohrgestänge Stück für Stück um etwa 10 Meter lange Rohre verlängert, die angeschraubt werden. Dieses Rotary-Bohrverfahren ist seit rund 100 Jahren im Einsatz.

Je nach Härte der durchbohrten Schicht wird ein Meißel mehr oder weniger schnell stumpf. Er muss dann ausgewechselt werden. Für eine 5000-Meter-Bohrung benötigt man ungefähr 30 Meißel. Um den Meißel auszuwechseln, wird das Bohrgestänge nach und nach aus dem Bohrloch gezogen, auseinandergeschraubt und anschließend wieder eingebaut. Ein Meißelwechsel dauert je nach Bohrlochtiefe unterschiedlich viele Stunden.

Anfangs konnte man nur senkrecht in die Tiefe bohren. Um ein großes Gas- oder Ölfeld zu erschließen, musste man daher Bohrturm neben Bohrturm errichten, weil ein Bohrloch nicht reichte, um das Erdöl aus den weit entfernten Bereichen der Lagerstätte zu fördern. Inzwischen gibt es die Richtbohrtechnik, mit der man in Kurven bohren kann. Damit lassen sich von einer Bohrinself aus viele Löcher in den Untergrund treiben und selbst mehrere Kilometer entfernte Gas- und Ölfelder erschließen.

Bei den ersten Richtbohrverfahren war es zunächst nur möglich, in einem vorher genau eingestellten Winkel zu bohren. Dazu wurde in den vorderen Teil des Bohrgestänges, die Bohrkrone, ein Hydraulikmotor eingebaut, dessen Achse um wenige Grad zum Bohrgestänge gekippt war. Auch in diesem Fall wurde das Bohrgestänge vom Bohrturm aus angetrieben. Schaltete man nun den Hydraulikmotor zu, wurde die Bohrung um den vorgegebenen Winkel abgelenkt. Der Winkel betrug nur wenige Grad, sodass die Bohrung in weitem Bogen abgelenkt wurde. Diese Krümmung war so gering, dass sich das Bohrgestänge nur minimal verbog.

Zudem kam dabei ein spezieller Stahl zum Einsatz, der leicht gebogen werden konnte, ohne zu brechen – so wie ein Strohalm, der sich ein wenig biegen lässt, ohne zu knicken.

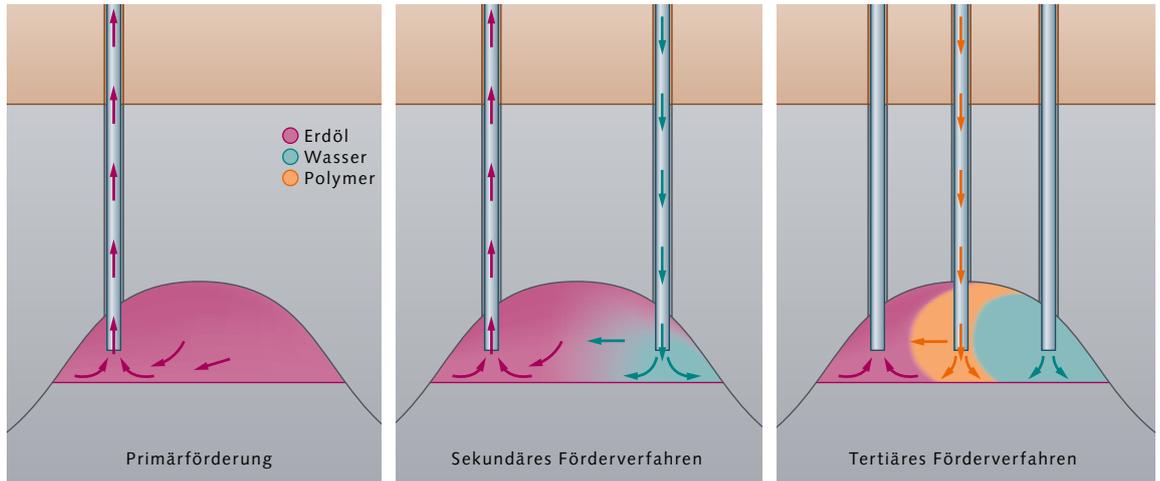


Mit modernen Richtbohrverfahren hingegen kann man die Richtung während des Bohrens verändern. Dazu wird hinter der Bohrkrone eine Steuereinheit mit sogenannten Steuerrippen, der Steuersub, montiert. Dieser sitzt wie ein Ring auf dem Bohrgestänge, das von der Bohranlage angetrieben wird. Die Steuerrippen lassen sich hydraulisch gegen die Bohrlochwand pressen und der Steuersub auf diese Weise verkeilen. Dadurch wird eine Kraft aufgebaut, die die Bohrkrone von ihrem Pfad ablenkt. Indem man jeweils andere Steuerrippen aktiviert und gegen die Wand presst, kann man die Bohrkrone in jede gewünschte Richtung ablenken. Sensoren überwachen während des Vortriebs die Lage der Bohrkrone im Raum. Über eine Computersteuerung wird der Kurs bei Bedarf automatisch korrigiert. Die Motoren und Generatoren für die Hydraulik sitzen direkt hinter dem Steuersub.

Heute sind Bohrspezialisten in der Lage, Horizontalbohrungen mit einer Länge von mehr als 12 Kilometern durch den Erdboden zu treiben, sogenannte Extended-Reach-Bohrungen. Zudem ist es möglich, aus einer Horizontalbohrung weitere Bohrungen abzweigen zu lassen. Experten sprechen von Multilateralbohrungen. Wie das Wurzelwerk eines Baumes verästeln sich solche Horizontalbohrungen, wodurch die Vorkommen sehr gut erschlossen werden können. Extended-Reach-Bohrungen werden unter anderem dafür eingesetzt, um von Land aus Offshore-Lagerstätten zu erschließen. Diese Methode wird seit vielen Jahren zum Beispiel bei der Erdölförderung an der deutschen Nordseeküste sowie bei aktuellen Projekten im Kaspischen Meer eingesetzt.

1.19 > Damit sich das Bohrloch nach unten hin nicht teleskopartig verengt, werden in jüngster Zeit auch spezielle dehnbare Rohre eingesetzt. Diese werden im Untergrund geweitet, indem man einen hydraulisch betriebenen Konus hindurchdrückt. Ein solches Verfahren wird Solid-Expandable-Tubular-Verrohrung genannt.

1.20 > Die Ölförderung wird in 3 Phasen unterteilt: Bei der Primärförderung fließt das Öl zunächst von selbst ins Bohrloch. Später halten Pumpen den Ölfluss aufrecht. Bei der sekundären Förderung wird Wasser in die Lagerstätte gepumpt, um den Lagerstättendruck künstlich zu erhöhen. Um zu verhindern, dass das eingepresste Wasser am Öl vorbei ins Bohrloch strömt, wird bei der tertiären Förderung zwischen Wasser und Öl ein Polymer injiziert. Alternativ lässt sich die Zähflüssigkeit des Öls durch Einpumpen von Heißwasser oder Lösemitteln verringern.



Wichtig für eine erfolgreiche Bohrung ist die Spülung des Bohrlochs mit einer wässrigen Lösung. Sie transportiert nicht nur das Gestein ab, sondern kühlt auch den Meißel – und sie erzeugt durch ihr Eigengewicht einen Gegendruck, der die Bohrlochwand stützt und verhindert, dass sie einstürzt. Die wässrige Lösung wird durch das Bohrgestänge bis hinab zum Bohrmeißel gepumpt und tritt dort in den Spalt zwischen Bohrgestänge und dem umgebenden Stein ein. In diesem Spalt steigt sie auch wieder nach oben.

Die Spülung ist jedoch ungeeignet, das Bohrloch auf Dauer zu sichern. Deshalb werden nach und nach Stahlrohre in das Bohrloch einzementiert, die die Wand stützen. Das Problem: Da sich der Bohrmeißel ständig weiter in die Tiefe vorarbeitet, müssen neue Rohrabschnitte durch den bereits zementierten Teil hinabgeschoben werden. Die Durchmesser der nachfolgenden Rohre müssen also immer kleiner sein als die der schon zementierten Rohrabschnitte. Dadurch verjüngt sich das Bohrloch nach unten hin teleskopartig. So hat eine Bohrung an der Oberfläche einen Durchmesser von bis zu 70 Zentimetern, in mehreren Kilometer Tiefe aber nur noch von wenig mehr als 10 Zentimetern. Für eine künftige Förderung mit hohen Förderraten ist jedoch ein möglichst großer Durchmesser sinnvoll. In jüngster Zeit kommen in Pilotprojekten deshalb nachgiebige Stahlrohre zum Einsatz. Sobald sie eingebaut sind, schickt man eine Art hydraulischen Kolben, einen Konus, hindurch, der sie weitet. So entsteht ein Rohr mit einheitlichem Durchmesser.

Wenn der Ölstrom versiegt

Beim Bohren nach Gas und Öl kommen grundsätzlich die gleichen Verfahren zum Einsatz. Die Förderung aber unterscheidet sich, denn Öl ist zähflüssig und strömt nur für begrenzte Zeit von allein zum Bohrloch. Das ist dann der Fall, wenn der Lagerstättendruck noch hoch genug ist. Dieser Strom versiegt aber, wenn sich die Lagerstätte entleert und der Druck zu stark abfällt. Der Lagerstättendruck muss demzufolge durch technische Verfahren nach und nach künstlich erhöht werden. Fachleute unterscheiden daher 3 Phasen der Ölförderung:

1. PRIMÄRFÖRDERUNG:

Während der Primärförderung strömt das Öl zunächst von sich aus zum Bohrloch. Wenn der Lagerstättendruck nachlässt und sich der Ölstrom verlangsamt, kommen sogenannte Tiefenpumpen, Pumpjacks, zum Einsatz, die das Öl an die Oberfläche saugen. Mit der Primärförderung können im Durchschnitt nur etwa 5 bis 30 Prozent des ursprünglich in der Lagerstätte vorhandenen Öls gefördert werden.

2. SEKUNDÄRE FÖRDERVERFAHREN:

Um die Lagerstätten besser auszubeuten, setzt man sekundäre Förderverfahren ein. Die am weitesten verbreitete Methode ist das Wasserfluten. Dabei wird am Rand der Lagerstätte Wasser eingepresst, das das Öl Richtung Bohrloch treibt. Der Lagerstättendruck wird durch das Einpum-

pen von Wasser also künstlich erhöht. In seltenen Fällen wird Erdgas in die Lagerstätten eingepresst. Das ist in Regionen der Fall, in denen Erdgas in großen Mengen zur Verfügung steht. Der wertvolle Rohstoff Erdgas wird später zurückgewonnen. Mit der sekundären Förderung lässt sich der Anteil des gewinnbaren Öls auf bis zu 45 Prozent erhöhen.

3. TERTIÄRE FÖRDERVERFAHREN:

Auch die sekundären Förderverfahren stoßen irgendwann an eine Grenze. Da Wasser und Öl eine ähnliche Dichte haben, kann es bei der sekundären Förderung geschehen, dass das eingepresste Flutwasser am Öl vorbei in die Bohrung fließt, sodass sich kaum noch Öl gewinnen lässt. Daher versucht man mithilfe sogenannter tertiärer Förderverfahren, die Zähflüssigkeit, die Viskosität, des Öls zu verringern. Dazu werden Heißwasser oder Lösemittel in die Lagerstätte eingepresst. Alternativ kann man verhindern, dass das Wasser am Öl vorbeiströmt, indem man zwischen Öl und Flutwasser einen Flüssigkunststoff, ein Polymer, einbringt. Dieses Polymer ist so viskos, dass das Wasser nicht hindurchströmen kann. So wird der Druck des eingepressten Flutwassers über das Polymer auf das Öl übertragen und das Öl aus der Lagerstätte herausgedrückt. Darüber hinaus werden derzeit Zusatzstoffe entwickelt, die die Viskosität des Wassers erhöhen. Auch dadurch lässt sich verhindern, dass das Wasser am Öl vorbeiströmt.

Tertiäre Verfahren werden auch als Enhanced Oil Recovery (EOR), übersetzt: verbesserte Ölgewinnung, bezeichnet. Sie werden heute eingesetzt, um ehemals stillgelegte Ölfelder zu erschließen. Zwar teurer als die Primärförderung, sind die EOR-Verfahren dennoch mit dem gestiegenen Ölpreis wirtschaftlich geworden. Mit den tertiären Verfahren können bis zu 60 Prozent des ursprünglichen Ölinhalts einer Lagerstätte gefördert werden. Das bedeutet, dass sich der Porenraum einer Lagerstätte nie völlig entleeren lässt, unter anderem weil physikalische Kräfte das Öl in den Poren zurückhalten. Rund 40 Prozent des Öls bleiben also im Untergrund.

Nach Schätzungen von Ölkonzernen trägt EOR heute 4 Prozent zur weltweiten Ölproduktion bei. Dieser Wert könnte bis zum Jahr 2030 auf 20 Prozent steigen, heißt es. Denn weltweit werden in den kommenden Jahrzehnten

viele Ölfelder so weit ausgebeutet sein, dass man auf tertiäre Verfahren umsteigen muss.

Auch in Erdgasvorkommen lässt der Lagerstätten- druck nach, wenn Erdgas gefördert wird. Um das übrige Gas zu gewinnen, reicht aber in der Regel der Einsatz von Pumpen, die das Gas ansaugen.

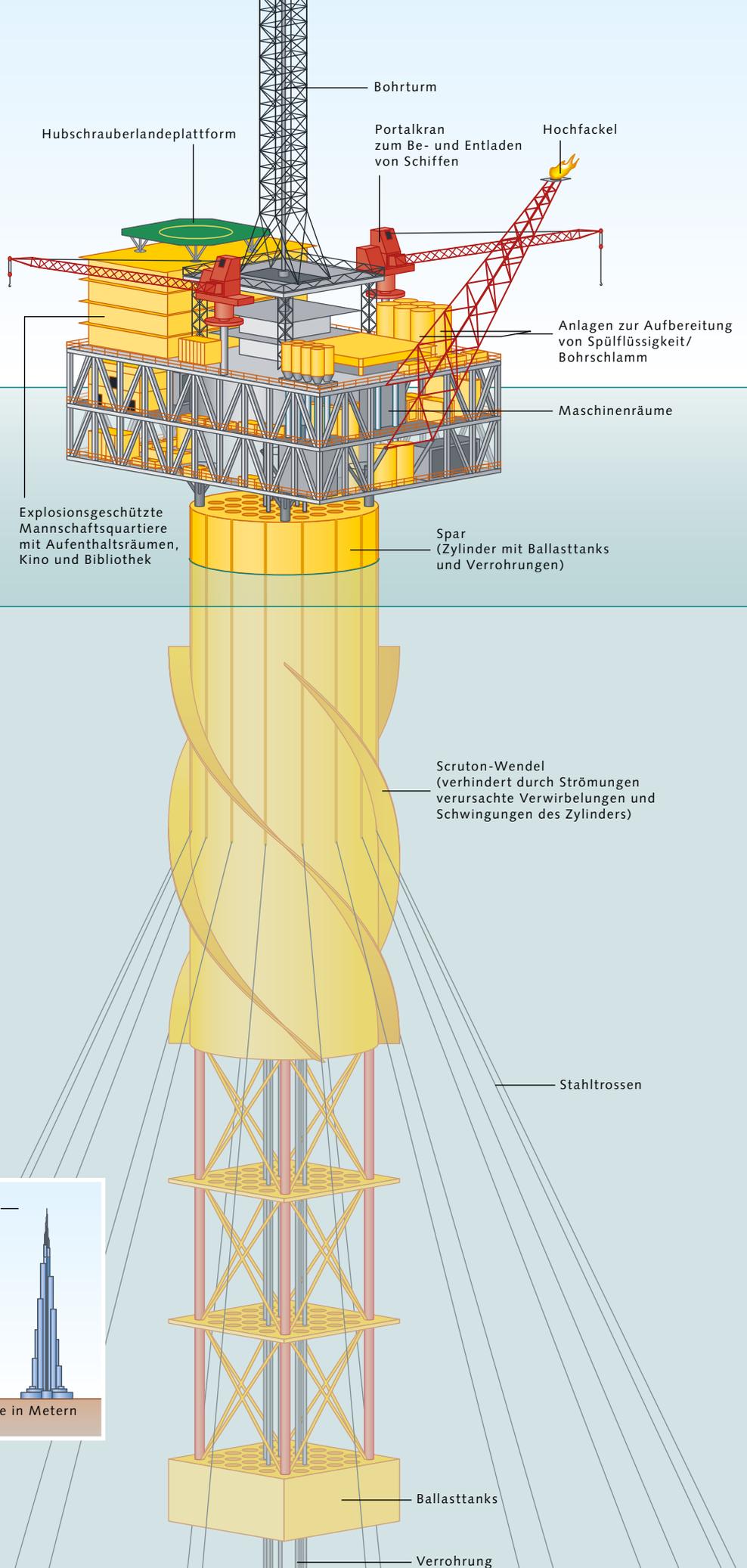
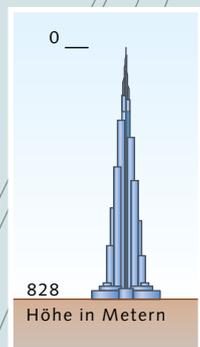
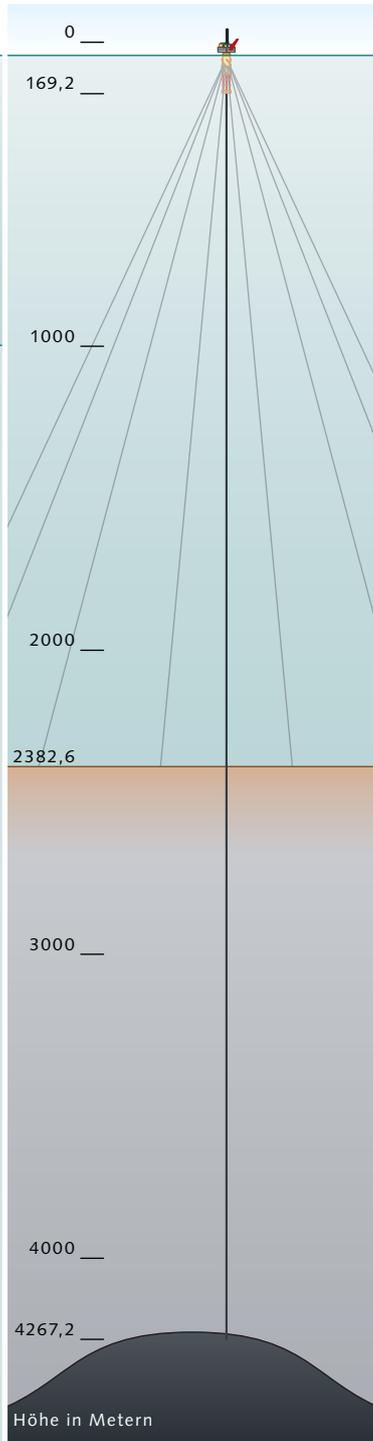
Mächtige Technik für große Tiefen

Auf der Suche nach neuen Gas- und Ölvorkommen im Meer sind die Energiekonzerne in immer größere Tiefen vorgedrungen. Ein Grund dafür waren die Ölkrisen in den 1970er Jahren, in deren Folge viele neue Vorkommen erschlossen wurden, beispielsweise in der Nordsee. Inzwischen sind viele Lagerstätten an Land und in den flachen Schelfgebieten vor den Küsten ausgebeutet oder bereits in der Phase der Enhanced Oil Recovery. Damit werden neue Lagerstätten in der Tiefsee zunehmend interessant. In den 1940er Jahren wurden erste Gas- und Ölanlagen noch in weniger als 10 Meter Wassertiefe auf Stegen oder Rampen errichtet, die fest mit dem Ufer verbunden waren. Später wurden Plattformen gebaut, die fest auf dem Meeresboden standen. Einige von ihnen sind so groß, dass sie selbst das Empire State Building in New York überragen würden.

Als das Öl knapp wurde – die Ölkrisen

Als Ölkrise bezeichnet man 2 Phasen in den 1970er Jahren, in denen sich das Ölangebot auf dem Weltmarkt aufgrund politischer Krisen verringerte, was nicht nur einen starken Ölpreisanstieg, sondern auch einen gesamtwirtschaftlichen Absturz zur Folge hatte. Die erste Ölkrise wurde 1973 durch den 20-tägigen Jom-Kippur-Krieg zwischen Israel auf der einen und Ägypten und Syrien auf der anderen Seite ausgelöst. Die von arabischen Staaten dominierte Organisation der Erdöl exportierenden Länder (Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC) drosselte die Fördermenge, um Druck auf die westlichen Länder auszuüben, Israel nicht weiter zu unterstützen. Die zweite Ölkrise folgte 1979/80, nachdem im Iran die Monarchie unter Schah Mohammad Reza Pahlavi durch die islamische Revolution beendet worden war. Kurz darauf erklärte der Irak dem Iran den Krieg. Die politische Unsicherheit bewirkte erneut eine Verknappung der Ölmenge auf dem Weltmarkt. Letztlich führten die Ölkrisen dazu, dass viele Länder neue, eigene Reserven erschlossen, um sich unabhängiger zu machen, zum Beispiel mit der Nordsee-Ölförderung.

1.21 > Schwimmende Plattformen wie diese Spar-Buoy-Konstruktion aus dem Golf von Mexiko kommen heute für die Ölgewinnung in besonders großen Tiefen zum Einsatz. Um die Vorkommen zu erreichen, muss nicht nur die Wassertiefe überwunden, sondern, wie hier in diesem Beispiel, fast genauso tief in den Boden gebohrt werden. Zur Veranschaulichung der Dimension ist das höchste Gebäude der Welt, Burj Khalifa in Dubai, in der Grafik abgebildet.



Heutzutage fördern Anlagen Gas und Öl aus annähernd 3000 Meter Wassertiefe. Da der Bau solcher Anlagen für Wassertiefen von mehr als 400 Metern technisch aufwendig und teuer ist, setzt man für große Tiefen heute vorwiegend schwimmende Anlagen ein.

Fachleute unterscheiden hierbei zwischen Bohr- und Förderanlagen. Bohranlagen werden genutzt, um ein Gas- oder Ölfeld zu erschließen. Häufig kommen schwimmende Bohrplattformen zum Einsatz, die bis hinunter zur Lagerstätte bohren. Anschließend werden sie zum nächsten Einsatzort geschleppt. Darüber hinaus gibt es auch große Bohrschiffe, die anders als die Plattformen nicht geschleppt werden müssen, sondern mit eigenem Antrieb von einem zum nächsten Vorkommen fahren.

Ist eine Bohrung fertig, wird das Bohrloch zunächst mit einem Bohrkopf am Meeresboden versiegelt. Dabei handelt es sich um eine Art Verschlusskappe von der Größe eines Pkw, die verhindert, dass Gas oder Öl austritt. Erst dann schleppt man die Bohrplattform weg. An ihrer Stelle wird dann zu einem späteren Zeitpunkt eine Förderplattform installiert. Der Bohrkopf wird wieder geöffnet und das Erdgas oder Erdöl aus der Lagerstätte gefördert.

In moderaten Wassertiefen baut man auch heute noch Förderanlagen, die fest auf dem Meeresboden stehen. Für große Tiefen hingegen kommen schwimmende Förderplattformen zum Einsatz. Außerdem gibt es Förderschiffe, sogenannte Floating Production Storage and Offloading Units (FPSOs) – schwimmende Produktions- und Lager-einheiten. Diese sind besonders flexibel und werden oft für kleinere Gas- und Ölvorkommen eingesetzt. Ist die Lagerstätte erschöpft, fahren sie zur nächsten weiter. Im Einsatz sind auch Anlagen, die sowohl für die Bohrung als auch die Förderung geeignet sind.

Kleine Industriestädte im Meer

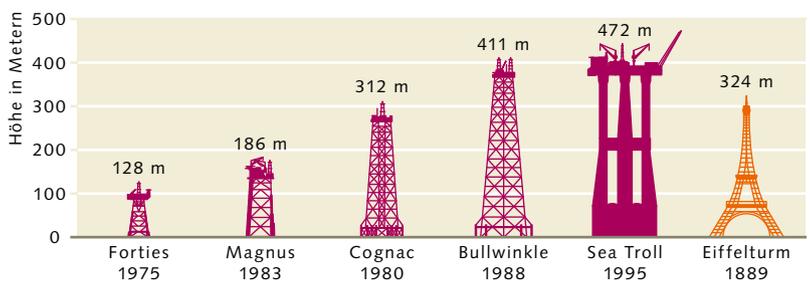
Ganz gleich ob es sich um eine Bohr- oder Förderanlage, eine auf dem Grund installierte oder eine schwimmende Plattform handelt: Jede dieser Anlagen ähnelt einer kleinen Industriestadt. An Bord können sich Fitness- und Konferenzräume befinden, Schlaf- und Wohnzimmer für bis zu 200 Arbeiter – und natürlich die Technik, mit der gebohrt oder gefördert wird. Dazu zählt bei Bohrplat-

formen zunächst die Bohranlage mit dem Bohrturm, über den das Bohrgestänge im Gestein versenkt wird. Gedreht wird das Gestänge entweder über einen Antrieb im Turm oder den Drehtisch direkt auf der Plattform, eine Art rotierende Scheibe, in deren Mitte das Gestänge fixiert ist. Hinzu kommen Pumpen, die die Spülung ins Bohrloch pressen.

Für die Förderung wiederum benötigt man Pumpen, die das Gas und Öl an die Oberfläche saugen, wenn der Lagerstättendruck abfällt. Da die Rohstoffe stets mit Sand und Wasser vermischt sind, stehen an Deck Anlagen, mit denen das Gemisch getrennt und aufbereitet wird. Hinzu kommen Tanks für Gas und Öl sowie Pumpen, die die Rohstoffe via Pipeline ans Land drücken oder in Tankschiffe füllen. Der für die Anlagen und den Wohnbereich erforderliche Strom wird mithilfe von Generatoren erzeugt.

Da Öl meist durch geringe Mengen von Erdgas verunreinigt ist, benötigt man auf Ölförderplattformen außerdem Prozessanlagen, die das Gas vom Öl abtrennen. Das Gas wurde früher meist abgefackelt und somit vergeudet. Das ist bedauerlicherweise auch heute noch der Fall. Inzwischen aber wird es häufiger genutzt – unter anderem um Stromgeneratoren auf Bohr- und Förderinseln anzutreiben. Fällt es in größeren Mengen an, wird es via Pipeline an Land gepumpt.

1.22 > Die Ölförderung verlagerte sich im Laufe der Zeit immer weiter aufs Meer hinaus. Da die Bohrsinseln noch auf dem Grund standen, wurden sie entsprechend immer größer und länger. Heute werden für große Tiefen meist schwimmende Plattformen eingesetzt.



Heute gibt es eine ganze Reihe verschiedener stehender oder schwimmender Bohr- und Förderanlagen, die für bestimmte Einsatzzwecke entwickelt wurden. Diese lassen sich den folgenden 3 Kategorien zuordnen:

FIXED PLATFORM: Dieser Typ steht auf einem Gestell auf dem Meeresgrund. Dazu gehören:

- **Hubinseln:** Hubinseln sind große Schwimmplattformen mit ausfahrbaren Stützen, auf deren Deck Kräne,

1.23 > Die Hubinsel „Constellation II“ kommt unter anderem bei der Erschließung von Erdgasfeldern vor Südamerika zum Einsatz. Während der Fahrt sind ihre Stützen hochgefahren, sodass sie wie Türme aufragen.

1.24 > Die Fachwerkstruktur der „Bullwinkle“-Plattform wurde an Land vorgefertigt und 1988 in den Golf von Mexiko geschleppt.



Unterkünfte, Bohr- oder Förderanlagen installiert sind. Sie werden mithilfe von Schiffen oder einem eigenen Antrieb an ihren Bestimmungsort gebracht. Dort werden die Stützen bis zum Meeresboden ausgefahren, sodass die Insel fest auf dem Grund steht. Der Vorteil ist, dass die Insel nach ihrem Einsatz an einen neuen Ort geschleppt werden kann. Ein Beispiel ist die Bohrplattform „Constellation II“. Diese wird unter anderem für Probebohrungen nach Erdgas eingesetzt.

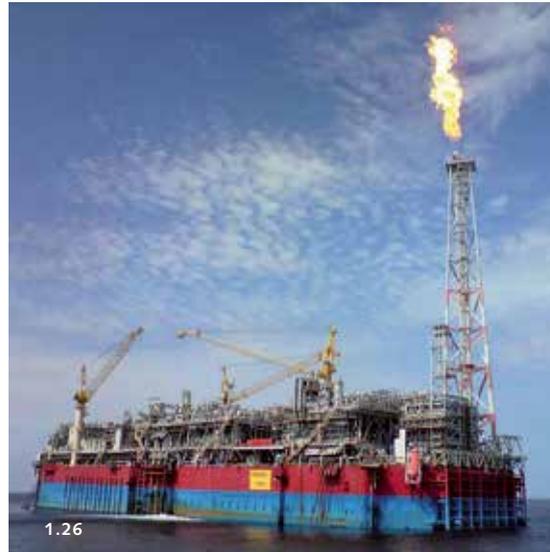
- **Stahlplattformen:** Stahlplattformen werden auf einem Turm aus Stahlfachwerk errichtet. Das Stahlgestell hat den Vorteil, dass es Wind und Wellen wenig Widerstand bietet. Stahlkonstruktionen sind unter anderem im Golf von Mexiko und in der Nordsee häufig anzutreffen. Die Rohre, mit denen man den Turm im Meeresboden verankert, sind mehrere Meter dick, da sie Konstruktionen mit einem Gewicht von mehreren 10 000 Tonnen tragen müssen. Die größte Plattform dieser Art ist die Ölplattform „Bullwinkle“, die 1988 als Förderplattform im Golf von Mexiko aufgestellt wurde. Sie hat eine Höhe von 529 Metern. Die Wassertiefe beträgt vor Ort 412 Meter. Die Stahlkonstruktion wurde an Land vorgefertigt und dann aufs Meer geschleppt. Stahlkonstruktionen von „Bullwinkle“-Größe werden als Förderplattform nur für große und ergiebige Gas- oder Ölfelder eingesetzt.

- **Betonplattformen:** Betonplattformen ruhen auf riesigen Hohlkörpern aus Stahlbeton. Auch sie werden sowohl wegen ihrer Größe als auch der aufwendigen Herstellung meist als Förderplattformen für große Gas- oder Ölfelder eingesetzt. Da der Wasserdruck in der Tiefe sehr hoch ist, sind die Hohlkörper kugelförmig oder zylindrisch geformt. Sie werden an Land vorgefertigt und dann an den Einsatzort geschleppt. Damit die Konstruktion nicht kippt, wird sie zum Teil geflutet. Dabei verbleibt in den Hohlkörpern noch so viel Luft, dass die Konstruktion wie ein riesiges Schiff stabil im Wasser liegt und schwimmt. Am Einsatzort dann wird die Konstruktion ganz auf den Meeresboden hinabgelassen. Später während des Betriebs dienen die Hohlkörper als Tanks, in denen das geförderte Erdgas und Erdöl gelagert werden kann. Ein Beispiel ist die Erdgasförderplattform „Sea Troll“, die 1996 im norwegischen Troll-Gasfeld in Betrieb genommen wurde. Die 472 Meter hohe Konstruktion wurde an Land vorgefertigt und dann aufs Meer geschleppt. Die Wassertiefe vor Ort beträgt 303 Meter.

COMPLIANT PLATFORM: Auch von diesem (anpassungsfähigen) Plattfortmtyyp gibt es verschiedene Varianten, beispielsweise Stahltürme, die zusätzlich mit Stahlrossen am Meeresboden verankert werden. Besonders häufig sind:



1.25



1.26

1.25 > Die norwegische „Sea Troll“ ist die größte Erdgasplattform weltweit. Sie wurde mit mehreren Schleppern an ihren Einsatzort gezogen.

1.26 > Das FPSO „Kizomba A“ ist Teil einer großen Ölförderanlage, die aus einer Förderplattform und mehreren Subsea-Einheiten besteht.

- **Tension Leg Platforms:** Die Tension Leg Platform (TLP) gehört zu den am weitesten verbreiteten Varianten. Diese besteht in der Regel aus einer Plattform, die mit mehreren Stützen auf einem großen Schwimmkörper ruht. Die TLP steht also nicht mit einem Turm auf dem Meeresboden. Stattdessen ist sie mit dicken Stahlrossen permanent am Grund verankert. Das Besondere ist, dass die Stahlrossen gespannt gehalten werden, damit die TLP ruhig im Wasser liegt. Dazu wird der Schwimmkörper zunächst teilweise geflutet und die Konstruktion abgesenkt. Dann werden die Stahlrossen montiert. Anschließend lässt man den Ballast wieder ab, wodurch die TLP etwas aufschwimmt. So werden die Stahlrossen zwischen Meeresboden und Schwimmkörper gespannt. Da der Schwimmkörper tief im Wasser liegt, bewegt sich die TLP anders als ein Schiff, das bei Seegang auf den Wellen reitet, auch bei Sturm nicht. Die Wellen rollen einfach unter der Plattform hinweg und an den Stützen vorbei. Ein weiterer Vorteil: Da man keinen festen Turm benötigt, können diese Konstruktionen auch für Erdgas- und Erdölfelder eingesetzt werden, die sich in großer Tiefe befinden.
- **Spar Buoys:** Eng verwandt mit der TLP sind Spar-Buoy-Konstruktionen. Bei diesen ruht die Plattform nicht auf mehreren Stützen, sondern auf einem ein-

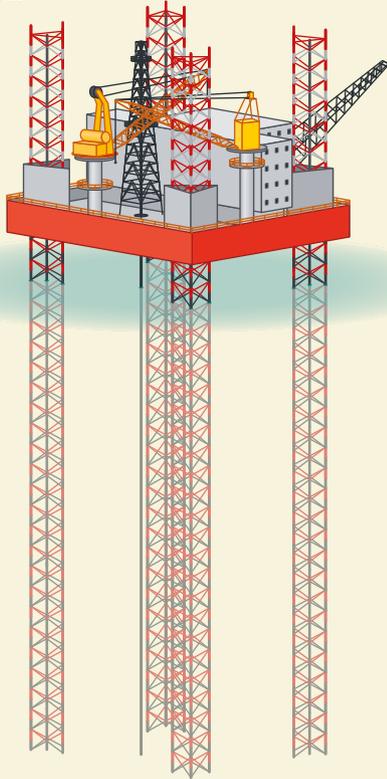
zigen langen zylindrischen Körper, der wie ein gigantisches Rohr senkrecht im Wasser steht. Wie bei einer Boje (englisch *buoy*) sorgt dieser Körper für Auftrieb. Dieser Typ wird erst seit knapp 20 Jahren in der Ölförderung eingesetzt. Ein Vorteil ist, dass die Zylinderkonstruktion Meeresströmungen wenig Widerstand bietet und damit auch wenig belastet wird. Der zylindrische Körper enthält Tanks für Gas und Öl sowie Ballasttanks, mit denen die Spar-Buoy-Konstruktion wie eine TLP auf- und absteigen kann. Wie die TLP wird die Spar-Buoy-Anlage mit permanent gespannten Stahlrossen am Meeresboden verankert. Der englische Begriff *spar* ist keine Abkürzung, sondern bedeutet, in Anlehnung an die zylindrische Struktur, schlicht Rundholz.

FLOATING PLATFORM: Zu den Floating Platforms zählen unter anderem kleinere Halbttaucherkonstruktionen, sogenannte Semi-Submersibles, die meist durch ihren eigenen Antrieb oder einfache Anker auf Position gehalten werden. Eine permanente Verankerung im Meeresboden wie die TLPs haben diese Plattformen in der Regel nicht. Diese Anlagen werden häufig für Bohreinsätze zu neuen Lagerstätten gefahren. Zu den Floating Platforms gehören auch Bohrschiffe sowie die FPSOs. Diese werden meist in der Nähe von Förderplattformen oder Subsea-Anlagen eingesetzt, mit denen sie über Leitungen verbunden sind. An

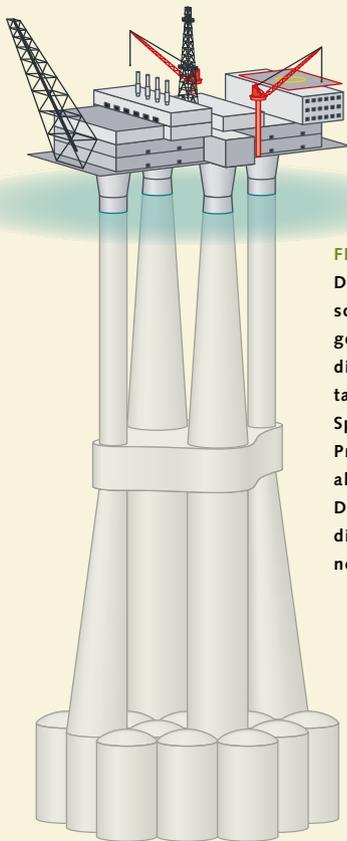
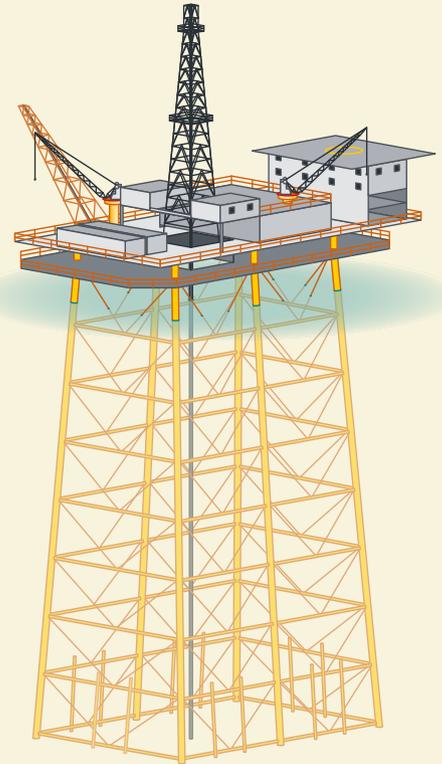
Die Plattformtypen der Gas- und Ölindustrie

1.27 > Um Erdgas und Erdöl aus dem Meer zu gewinnen, wurden in den vergangenen Jahrzehnten verschiedenste Bohr- und Förderplattformen entwickelt, die sich in mehrere Klassen einteilen lassen.

FESTE PLATTFORM:
Die Hubinsel steht auf ausfahrbaren Stützen. Sie kann schnell in neue Einsatzgebiete bewegt werden, beispielsweise um neue Erdgasfelder zu erschließen. Ein Beispiel ist die Hubinsel „Constellation II“.

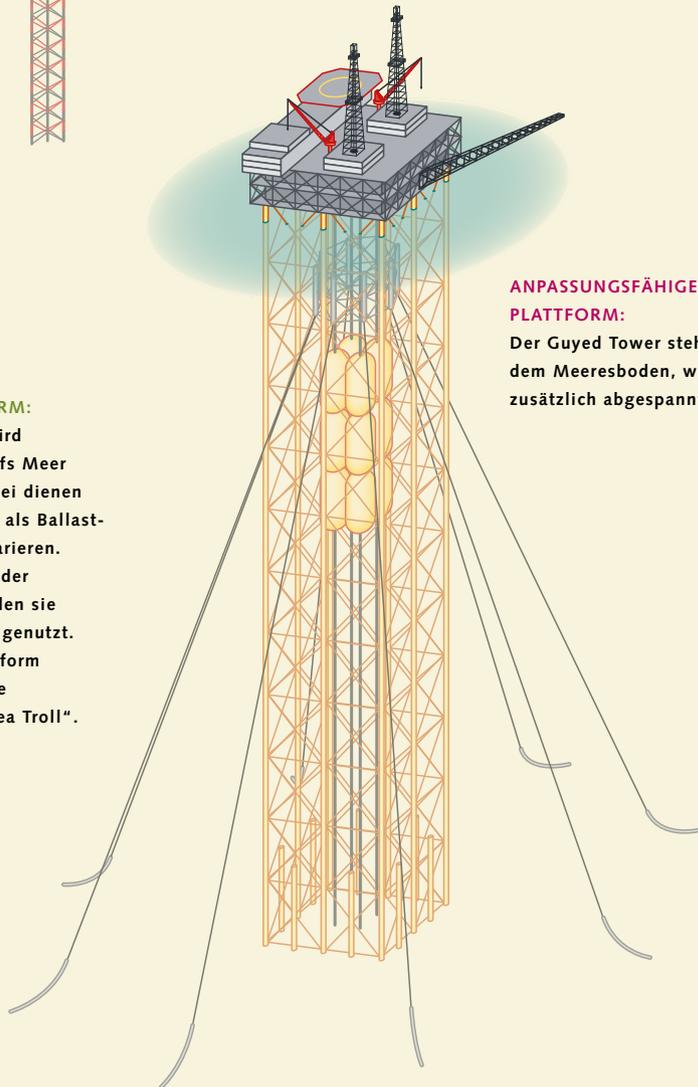


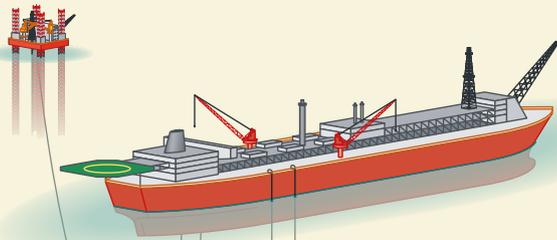
FESTE PLATTFORM:
Stahlkonstruktionen wie die US-amerikanische „Bullwinkle“-Plattform werden an Land vorgefertigt und dann aufs Meer geschleppt.



FESTE PLATTFORM:
Die Plattform wird schwimmend aufs Meer geschleppt. Dabei dienen die Betonkörper als Ballasttanks zum Austarieren. Später während der Produktion werden sie als Gasspeicher genutzt. Die größte Plattform dieser Art ist die norwegische „Sea Troll“.

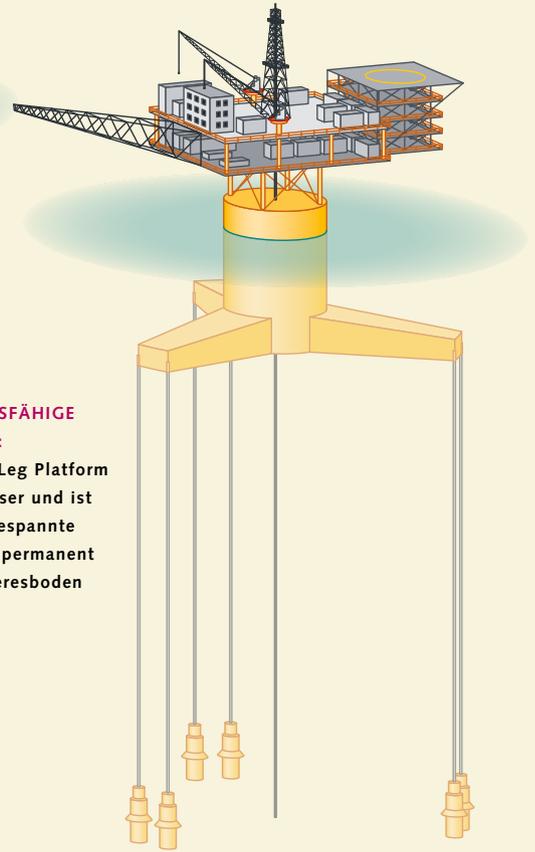
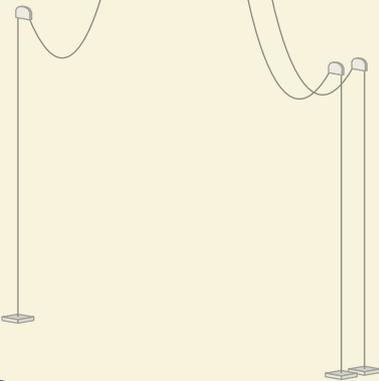
ANPASSUNGSFÄHIGE PLATTFORM:
Der Guyed Tower steht auf dem Meeresboden, wird aber zusätzlich abgespannt.





**SCHWIMMENDE
PLATTFORM:**

FPSOs wie die „Kizomba A“ liegen frei im Wasser und halten sich mit mehreren Antrieben oder einfachen Ankern auf Position. Sie können Öl fördern, lagern und aufbereiten. Über einige der Leitungen wird Wasser für die sekundäre Ölförderung in den Untergrund gepumpt.



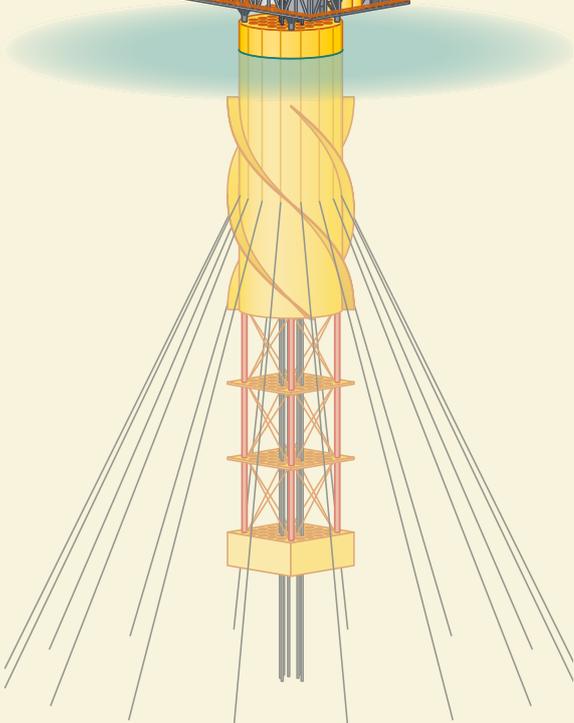
**ANPASSUNGSFÄHIGE
PLATTFORM:**

Die Tension Leg Platform liegt im Wasser und ist über straff gespannte Stahlrossen permanent mit dem Meeresboden verbunden.



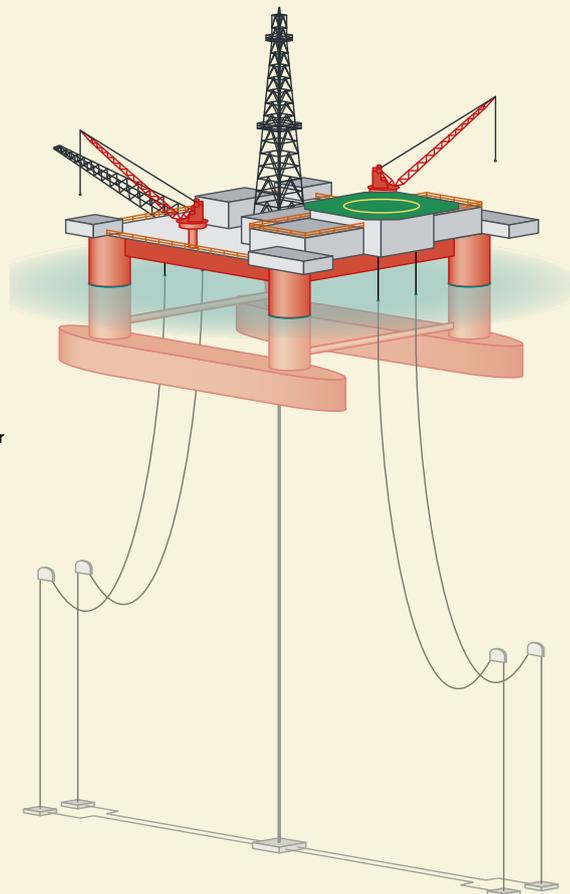
**ANPASSUNGSFÄHIGE
PLATTFORM:**

Spar Buoy gehören zu den Tiefenrekordhaltern der Ölförderung.



**SCHWIMMENDE
PLATTFORM:**

Die Semi-Submersible-Plattform liegt frei im Wasser. Sie hält sich mit Motoren oder mehreren einfachen Ankern auf Position und kann schnell in neue Einsatzgebiete bewegt werden. Für die sekundäre Ölförderung wird Wasser über die Leitungen in die Lagerstätte gepumpt. Über das Bohrgestänge unter der Plattform wird das Öl dann gefördert.



1.28 > Förderplattformen gehören seit Jahrzehnten zur Offshore-Industrie von Öl und Gas. Wichtige Förderregionen sind die küstennahen Meeresgebiete vor Südamerika oder Westafrika – oder, wie hier im Bild zu sehen, der Golf von Thailand.



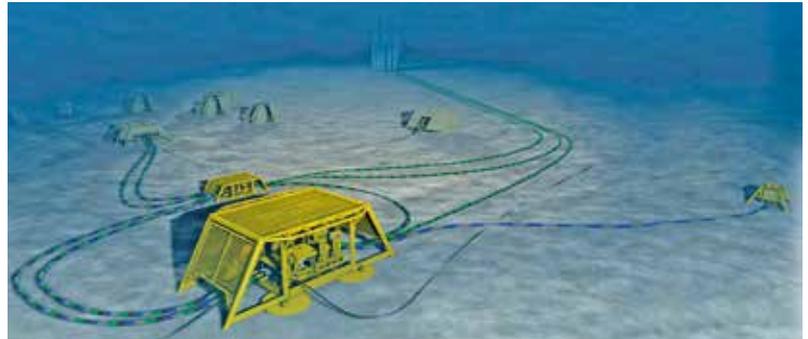
Bord der FPSOs befinden sich oftmals Reinigungsanlagen für Gas und Öl sowie große Tanks, über die meist Tank-schiffe befüllt werden. Ein Beispiel ist die 285 Meter lange FPSO „Kizomba A“, die vor Angola bei der Ölförderung zum Einsatz kommt.

Fördertechnik am Boden

Die Gas- und Ölförderung ist heute nicht mehr auf große Plattformen auf der Meeresoberfläche beschränkt. Eine Alternative sind Subsea-Completion-Anlagen. Dabei werden auf Stahlgestellen verschiedene wasserdichte Komponenten wie etwa Kompressoren, Pumpen oder Separatoren für die Gas- und Ölreinigung direkt auf dem Grund abgesetzt. Mithilfe von Unterwasserrobotern werden die Komponenten dann zu großen Förder-Ensembles verknüpft. Die Subsea-Completion-Systeme werden nicht zu den Plattformen gezählt und sind eine eigene Klasse von Offshore-Anlagen. Sie werden in der Regel im Tief- und Tiefstwasserbereich eingesetzt.

Subsea-Vorrichtungen haben mehrere Vorteile. Zum einen arbeiten die Anlagen effizienter, wenn Pumpen und Verdichter näher an der Quelle sind – das heißt: am Meeresboden –, und zum anderen kann man dann das Gas- oder Öl-Wasser-Sand-Gemisch, das aus dem Bohrloch aufsteigt, bereits vor Ort reinigen und aufbereiten, ohne es bis zur Bohrinsel pumpen zu müssen. Dadurch kann die Fördertechnik kleiner ausgelegt werden, was beträchtliche Kosten spart. Zudem kommt man dank der Unterwassertechnik in großen Gas- und Ölfeldern mit weniger Fördertechnik aus. Selbst wenn man mit Richtbohrtechnik von einer Bohrplattform aus arbeitet, bleibt der Radius, in dem man fördern kann, beschränkt. Setzt man die Pumpen und Verdichter hingegen auf den Meeresgrund, können Gas und Öl aus vielen Bohrstellen, die in weitem Umkreis liegen, zu einer gemeinsamen Förderstation gepumpt und von dort an Land oder beispielsweise zu einer FPSO gedrückt werden.

Derartige Subsea-Installationen gibt es heute im Golf von Mexiko, vor Südamerika, Westafrika oder Norwegen. Im Perdido-Ölfeld im Golf von Mexiko beispielsweise sind einzelne Ölplattformen auf der Wasseroberfläche mit bis zu 30 Bohrlochköpfen in der Tiefe verbunden. Eine Plattform fördert damit Öl aus einer Vielzahl von Bohrungen.



1.29 > Gas und Öl werden in großer Tiefe immer öfter mit Subsea-Anlagen gewonnen, die auf dem Meeresboden liegen. Diese Anlagen sind modular aufgebaut. Einzelne Komponenten wie Bohrlochköpfe oder Kompressoren sind über Leitungen zu Ensembles verknüpft.

Im Gasfeld Ormen Lange vor Norwegen wiederum wurden auf einer Fläche von knapp 500 Quadratkilometern rund 50 Bohrlochköpfe am Meeresboden installiert. Diese sind mit einigen wenigen gemeinsamen Subsea-Förderstationen unter Wasser verbunden, die das Gas via Pipeline zum Land pumpen. Für derartige Projekte müssen immer wieder spezielle Geräte und Maschinen entwickelt werden. Bereits am Markt sind Unterwasserkompressoren, die den Druck in den Erdgasreservoirs erhöhen, wenn sie sich langsam leeren und der Lagerstättendruck sinkt.

Die Entwicklung von Subsea-Geräten bleibt eine Herausforderung, denn die Bauteile und Maschinen sowie die elektronischen Komponenten müssen nicht nur wasserfest sein und hohe Wasserdrücke aushalten können, sondern auch sehr zuverlässig arbeiten. Auf Offshore-Plattformen können Kompressoren, Pumpen und Verdichter jederzeit gewartet werden; bei Anlagen in der Tiefe ist das nicht ohne Weiteres möglich. Dort wäre ein Maschinenschaden fatal.

Weltweit arbeitet man daher an der Entwicklung von robusten Systemen, die über viele Jahre rund um die Uhr funktionieren, zum Beispiel Kompressoren, die das Erdgas in die Pipelines pumpen. Normalerweise werden die Lager von Kompressoren mit Öl geschmiert. In den Subsea-Geräten hingegen kommen heute bereits elektrisch geregelte Magnetlager zum Einsatz, in denen die Welle schwebt. Die Verarbeitung von Öl und Gas mit Subsea-Anlagen erwirtschaftet heute gut 20 Milliarden US-Dollar. Fachleute schätzen, dass sich dieser Wert bis 2020 verdoppeln könnte.

Von der Verölung der Ozeane

> Immer noch ist das Meer durch Ölverschmutzung gefährdet. Ölunfälle haben allerdings einen geringen Anteil daran. Das größte Problem bleibt die schleichende Verölung durch Abwässer oder die Schifffahrt. Schutzkonventionen, eine bessere Überwachung der Seewege und Notfallpläne aber tragen dazu bei, dass inzwischen weniger Öl ins Meer gelangt. Und auch aus der Explosion der Plattform „Deepwater Horizon“ scheint man gelernt zu haben.

Das böse Erwachen nach der Havarie der „Torrey Canyon“

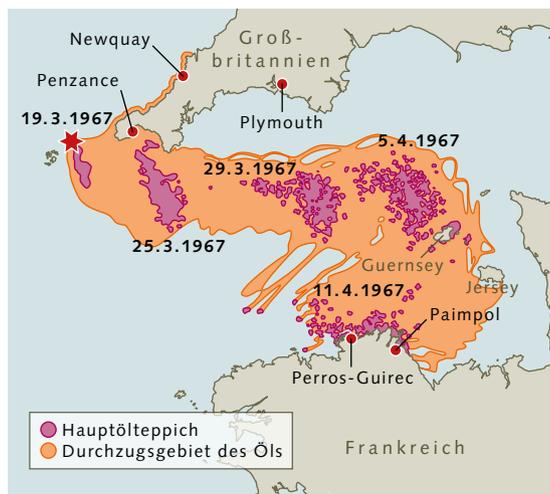
Die weltweite Ölförderung führt immer wieder zu Umweltproblemen. An Land verseuchen marode Pipelines die Böden, und im Meer vergiften havarierte Öltanker Lebewesen, verkleben das Gefieder von Seevögeln und verdrecken Küsten. Welche Probleme die Gewinnung und der Transport von Erdöl mit sich bringen, wurde insbesondere in den 1960er und 1970er Jahren deutlich. Als damals die ersten Supertanker in den Dienst gestellt wurden, stieg zugleich auch das Gefahrenpotenzial für die Umwelt. Von den ersten schweren Ölunfällen, die sich in diesen Jahren ereigneten, waren meist viele Tausend Menschen betroffen. Die erste große Ölkatastrophe geschah 1967, als der Tanker „Torrey Canyon“ bei den Scilly-Inseln vor der Südwestspitze Englands mit einer Ladung von 119 000 Tonnen Öl auf ein Riff lief und leckschlug. Das Öl bildete einen 1000 Quadratkilometer großen Ölteppich, der die Küste von Cornwall, der Kanalinsel Guernsey und von Frankreich stark verschmutzte.

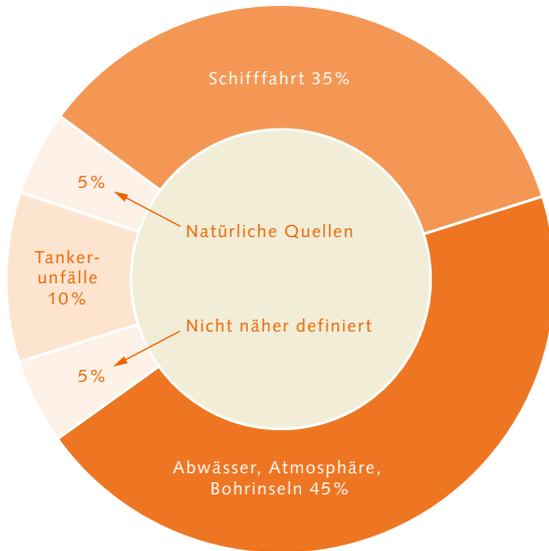
Die schleichende Ölpest

Auch heute noch ereignen sich immer wieder Schiffsunfälle oder Explosionen von Bohrinseln wie die der „Deepwater Horizon“ im Frühjahr 2010, bei denen in kurzer Zeit viel Öl frei wird. Am meisten Öl gelangt aber nicht durch derartige spektakuläre Ereignisse, sondern auf unauffälligeren Wegen ins Meer. Insgesamt geht man heute von gut 1 Million Tonnen Öl jährlich aus, die ins Meer fließt. Rund 5 Prozent stammen aus natürlichen Quellen, zum Beispiel im Golf von Mexiko, wo Öl durch Risse und Spalten im Untergrund aus den Lagerstätten bis zum Meeresboden aufsteigt. In anderen Regionen wie etwa dem Kaspischen Meer gelangt Erdöl in großen Mengen durch Schlammvulkane aus dem Untergrund ins Wasser. Schlammvulkane sind keine Vulkane im eigentlichen Sinn, sondern Erhebungen im Meeresboden, aus denen wasserhaltiges Sediment hervorquillt. Das Sediment erhitzt sich in großer Tiefe im Untergrund, steigt dadurch auf und kann Öl aus benachbarten Lagerstätten mit nach oben tragen.

1.30 > Die „Torrey Canyon“ lief im März 1967 vor Südküstenland auf ein Riff. Das Öl des havarierten Tankers verschmutzte nicht nur die englische Südküste, sondern trieb innerhalb von 3 Wochen bis zur Bretagne und zur Normandie.

1.31 > Die Royal Air Force bombardierte das Schiff, um es samt seiner restlichen Ladung zu versenken, und steckte den Ölteppich in Brand. Die Rauchfahne war mehr als 100 Kilometer weit zu sehen.





1.32 > Öl gelangt auf verschiedenen Wegen ins Meer. Die größte Menge stammt aus Abwässern und dem Routinebetrieb von Bohr- und Förderinseln.

10 Prozent tragen Tankerunfälle zur Verölung bei. 35 Prozent gelangen während des regulären Schiffsverkehrs ins Meer. Dazu zählt Öl, das bei Unfällen von allen möglichen anderen Schiffstypen frei wird, sowie Öl, das durch illegale Tankreinigungen ins Wasser gelangt. Der mit 45 Prozent größte Teil der Ölverschmutzungen stammt aus industriellen oder kommunalen Abwässern sowie aus dem Routinebetrieb von Bohr- und Förderinseln und zu einem kleinen Teil aus der Atmosphäre, über die flüchtige Ölbestandteile von Verbrennungsprozessen an Land ins Wasser eingetragen werden. Etwa 5 Prozent lassen sich nicht näher zuordnen. Dazu zählen kleinere Ölverschmutzungen im Meer, deren Verursacher unentdeckt bleiben. Für 2010 und andere Jahre, in denen sich große Ölfälle ereignet haben, gelten diese Verhältnisse natürlich nicht. So wurden allein mit dem Untergang der „Deepwater Horizon“ rund 700 000 Tonnen Öl frei – mehr als zwei Drittel der Menge, die sonst weltweit in einem ganzen Jahr ins Meer gelangt.

Erfolge im Kampf gegen die Verölung

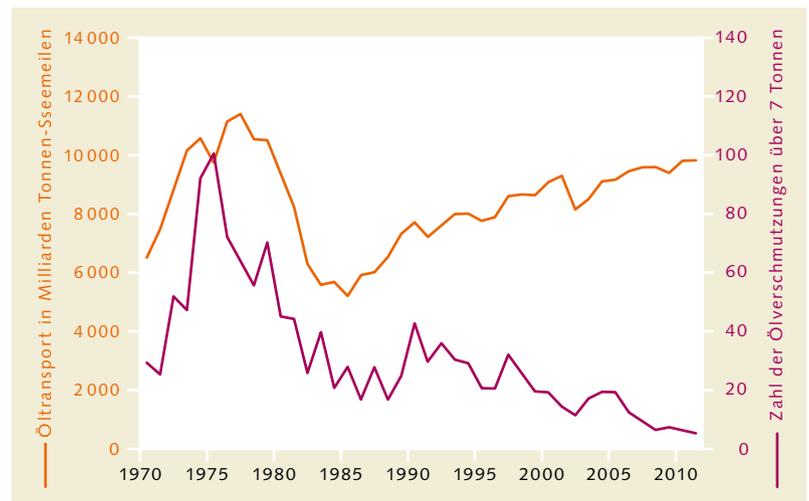
Positiv zu bewerten ist, dass die Zahl der Ölverschmutzungen, die durch Tankerunfälle oder technische Defekte und Explosionen auf Tankern verursacht werden, in den vergangenen Jahrzehnten deutlich abgenommen hat. Und

das, obwohl von Jahr zu Jahr mehr Öl transportiert wird. Gab es in den 1970er Jahren noch zwischen 50 und 100 größere Verschmutzungen pro Jahr, so sind es seit Anfang dieses Jahrtausends weniger als 20 jährlich. Berücksichtigt werden dabei Ölverschmutzungen von mindestens 7 Tonnen; kleinere Mengen sind statistisch nicht systematisch erfasst.

Entsprechend verringerte sich allmählich die Menge des freigesetzten Öls. Nur etwa 3,7 Prozent des zwischen 1970 und 2009 aus Tankern ausgelaufenen Öls entfallen auf die Zeit nach der Jahrtausendwende. Am meisten Öl gelangte in den 1970er Jahren ins Meer – etwa 15-mal mehr als zwischen 2000 und 2009.

Diesen Rückgang führen Fachleute insbesondere auf internationale Konventionen und Vorschriften zum Schutz der Meere zurück, die als Folge der verschiedenen Ölunfälle nach und nach eingeführt wurden. Zu den wichtigsten zählt das Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78), mit dem 1983 unter anderem Meeresschutzgebiete ausgewiesen wurden, in denen der Tankerverkehr ganz oder teilweise eingeschränkt ist. Das Übereinkommen bewirkte einen Rückgang der Tankerunfälle während der 1980er Jahre. Außerdem ebnete MARPOL 73/78 den Weg zum Bau von Doppelhüllentankern. So muss heute jeder Tankerneubau eine doppelte Schiffswand haben. Bricht bei einer Kollision die Außenhaut, bleiben die Tanks innen meist intakt.

1.33 > Obwohl die über die Ozeane transportierte Ölmenge seit den 1970er Jahren gestiegen ist, hat die Zahl der durch Tankerunfälle verursachten Ölverschmutzungen im Meer abgenommen. Berücksichtigt sind Ölverschmutzungen von mindestens 7 Tonnen.



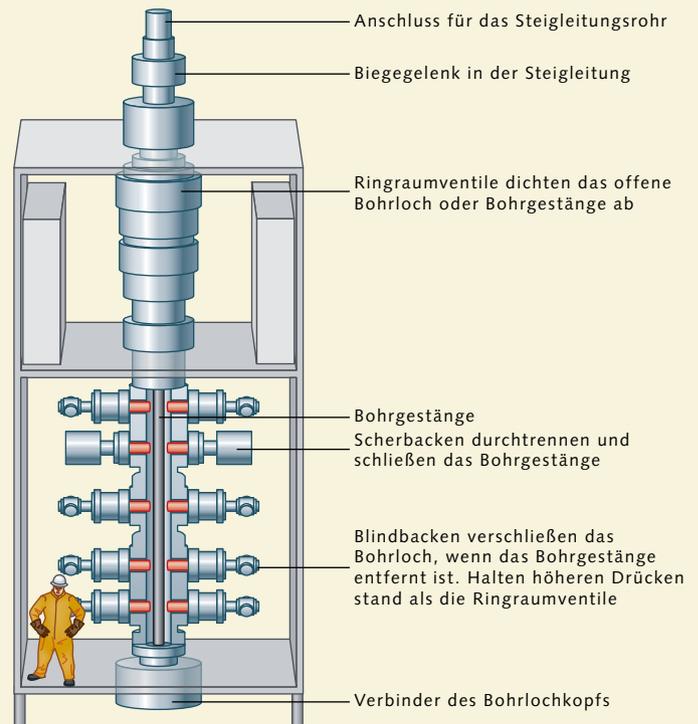
„Deepwater Horizon“ – der GAU der Offshore-Ölindustrie

Die Explosion der schwimmenden Bohrinself „Deepwater Horizon“ am 20. April 2010 war der größte Ölunfall aller Zeiten, bei dem rund 700 000 Tonnen Rohöl in den Golf von Mexiko flossen; nur während des Golfkriegs in Kuwait im Jahr 1990 gelangte noch mehr Öl ins Meer. 11 Arbeiter starben, 16 wurden schwer verletzt. In seinem Untersuchungsbericht kam ein US-Expertenkomitee im Dezember 2011 zu dem Schluss, dass eine ganze Reihe von technischen Defekten und Fehlentscheidungen zu dem Unglück geführt hatten. In der Folge wurde kontrovers diskutiert, wer dafür verantwortlich ist beziehungsweise wie sich derartige Unfälle künftig vermeiden lassen.

Die „Deepwater Horizon“ war eine sogenannte Halbtaucheranlage, eine schwimmende Bohrplattform, mit der neue Ölfelder in großer Tiefe erschlossen werden. Derartige Anlagen werden von Dienstleistungsunternehmen betrieben, die für Ölkonzerne die Bohrarbeiten übernehmen. Zu Beginn einer Bohrung bohrt man zunächst nur wenige Meter tief in den Meeresboden hinein. Dann sichert man das Bohrloch mit einem Standrohr ab, das in das Bohrloch getrieben wird. Dieses Standrohr hat 2 Funktionen: Erstens verhindert es, dass das Bohrloch gleich wieder einstürzt. Zweitens trägt es den sogenannten Blowout-Preventer (BOP), der am Meeresboden auf das Standrohr aufgesetzt wird. Dieser BOP ist ein etwa 10 Meter hoher Aufbau, der mithilfe von Ventilen verhindern soll, dass während der Bohrung oder nach Abschluss der Bohrarbeiten unkontrolliert Erdgas und Erdöl aus dem Bohrloch schießen. Er umgibt das Bohrgestänge wie eine überdimensionale Manschette. Für den Fall, dass die Ventile versagen, ist er außerdem mit Schlagbolzen, Shear Rams, ausgestattet. Wie 2 Zähne quetschen die Shear Rams das Bohrgestänge zusammen, sodass kein Öl mehr aus dem Bohrloch beziehungsweise dem BOP austreten kann.

Hat der Dienstleister ein Ölvorkommen erschlossen, ist seine Arbeit beendet. Das Bohrgestänge wird entfernt, die BOP-Ventile geschlossen und das Bohrloch so gesichert. Die Bohrinself wird zur nächsten Bohrstelle gefahren oder geschleppt. Der BOP bleibt so lange verschlossen, bis über ihm eine Förderanlage installiert worden ist. Erst wenn er per Rohr oder Schlauch an die Förderanlage angeschlossen ist, werden seine Ventile geöffnet und die Förderung kann beginnen.

Die Explosion der „Deepwater Horizon“ eignete sich zum Schluss der Bohrarbeiten beim Versiegeln der Bohrung in etwa 1500 Meter Wassertiefe, also noch vor Beginn der Ölförderung. Kritisch war der Moment, in dem die Spülflüssigkeit aus dem Bohrloch gepumpt wurde. Diese Spülflüssigkeit wird beim Bohren in die Tiefe gepumpt, um das zertrümmerte Gestein aus dem Bohrloch zu fördern. Darüber hinaus stabilisiert sie das Bohrloch. Immerhin herrscht in der Lagerstätte hoher Druck, der normalerweise dazu führen würde, dass das Erdöl und das oft in ihm enthaltene Erdgas die Bohrwand zerreißen und aus dem Bohrloch schießen. Die Spülflüssigkeit erzeugt den erforderlichen Gegendruck. Ist der Bohrvorgang beendet, wird das Bohrgestänge mit dem Bohrkopf aus dem Bohrloch gezogen und die Spülflüssigkeit



1.34 > Der turmhohe Blowout-Preventer hat die Funktion eines überdimensionalen Stöpsels. Er sichert Bohrlöcher am Meeresboden mit Ventilen und Schlagbolzen, den Shear Rams. Dass es zur Katastrophe kam, lag auch daran, dass die BOP-Technik versagte.

durch Meerwasser ersetzt. Wasser hat allerdings eine deutlich geringere Dichte und übt damit weniger Druck auf das in der Lagerstätte anstehende Erdgas und Erdöl aus. Die Bohrung wird deshalb tief im Gestein zusätzlich mit Zement verstopft. Währenddessen testen die Bohrspezialisten an Deck durch Druckmessungen, ob der Zement in der Tiefe tatsächlich dicht hält. Auch diese Zementierungsarbeiten werden von spezialisierten Dienstleistern übernommen. Das heißt also, dass auf einer Bohrinself wie auf einer gewöhnlichen Baustelle auch stets Arbeiter von mehreren Firmen aktiv sind, zwischen denen die Arbeit genau abgestimmt werden muss.

Im Fall der „Deepwater Horizon“ wiesen die Tests auf Druckprobleme und unsachgemäße Zementierungen hin. Die Ingenieure an Bord aber interpretierten die Ergebnisse fatalerweise als Messfehler und tauschten weiter Spülflüssigkeit gegen Meerwasser aus. Dann kam es zum Unglück: Erdgas schoss aus der Lagerstätte unter hohem Druck in die Bohrung. Da der Zement versagte, konnte das Gas durch das Bohrgestänge bis zur Förderplattform aufsteigen. Es sammelte sich dort an Deck und entzündete sich vermutlich durch einen Funken im Maschinenraum. Normalerweise hätte der bereits am Meeresboden installierte



1.35 > Nach der Explosion am 20. April 2010 brannte die Bohrplattform „Deepwater Horizon“ noch mehrere Tage lang. Versuche, sie mit Wasserkanonen zu löschen, schlugen fehl. Schließlich kenterte die Insel und versank im Golf von Mexiko.



1.36 > Trotz solcher Barrieren schwappte Öl an die Küste von Louisiana.

Blowout-Preventer diesen Gasausbruch verhindern müssen. Doch auch die Shear Rams versagten. Durch die Explosion geriet die Bohrstelle völlig außer Kontrolle, sodass fast 3 Monate lang Öl in großen Mengen austreten konnte. Mit ferngesteuerten Unterwasserrobotern versuchte man vergeblich, die Shear Rams am BOP auszulösen.

Das Komitee zählte in seinem Untersuchungsbericht im Detail technische Mängel und Fehlentscheidungen auf, die in der Summe zum Unglück geführt haben. Es kam zu dem Schluss, dass in der Tiefseeölförderung erhebliche Verbesserungen nötig sind. Das betrifft die Technik, beispielsweise die BOP-Konstruktion, Sicherheitsmaßnahmen beim Management und vor allem auch die Kommunikation zwischen den verschiedenen Dienstleistern und dem Bohrleiter, dem Operator. Dass die Tiefseeölförderung besonders anspruchsvoll und problematisch ist, zeigte sich auch darin, dass es dem Auftraggeber BP lange nicht gelang, das Leck am Meeresboden zu schließen. Erst im Juli 2010, 3 Monate nach dem Unglück, konnten die Ingenieure einen sogenannten Capping Stack, einen Stahlaufsatz, auf den BOP montieren. Der Capping Stack fing das aus dem BOP strömende Öl auf und leitete es zu einer Förderplattform.

Das Komitee schätzt die wirtschaftlichen Kosten der Katastrophe auf mehrere 10 Milliarden US-Dollar. Um zu verhindern, dass mit giftigen Kohlenwasserstoffen belastete Fische und Meeresfrüchte auf den Markt kommen, wurde im Anschluss an den Unfall im Golf von Mexiko beispielsweise ein Gebiet von rund 200 000 Quadratkilometern für die Aquakultur und den Fischfang gesperrt.

Zwar wurde inzwischen ein Großteil davon wieder freigegeben, aber in manchen stark betroffenen Gebieten wie etwa im Mississippi-Delta ist die Austernzucht bis heute untersagt. Auch die Tourismusindustrie in Louisiana, Mississippi, Alabama und im Nordwesten von Florida ist stark betroffen. Der Verband der US-Tourismusbranche schätzt die Verluste allein in den 3 Jahren nach dem Unfall auf rund 23 Milliarden US-Dollar. Für die entstandenen Schäden wurde BP bereits zu einer Strafe von



1.37 > Auch Schutzwände konnten Dauphin Island nicht retten.

4 Milliarden US-Dollar verurteilt. Hinzu kommen Entschädigungszahlungen in Höhe von rund 8 Milliarden US-Dollar aus Zehntausenden Zivilklagen, die außergerichtlich beigelegt wurden. Nach Aussage von Wirtschaftsexperten hat die Explosion der „Deepwater Horizon“ das Unternehmen insgesamt rund 42 Milliarden US-Dollar gekostet.

Bislang gibt es noch keine umfassende wissenschaftliche Untersuchung darüber, wie viele und welche Maßnahmen durchgeführt wurden, um die Offshore-Ölförderung sicherer zu machen. Verschiedene Aspekte aber wurden inzwischen verbessert. Unter anderem haben die Hersteller ihre BOP-Systeme mit zuverlässigeren Ventilen und Shear Rams ausgestattet. Darüber hinaus hat die zuständige US-Behörde für Sicherheit und Umweltrecht, das Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE), die Sicherheitsauflagen verschärft. Inzwischen wurde beispielsweise das sogenannte Stoppkartenprinzip durchgesetzt. Das besagt, dass jeder Arbeiter auf einer Bohrinsel einen anderen auf seine Fehler hinweisen darf und muss – ungeachtet seiner Position. Erkennt ein Arbeiter einen Fehler, muss auch ein vorgesetzter Ingenieur entsprechend reagieren und seine Entscheidung korrigieren. Zwar gab es dieses Stoppkartenprinzip schon vor dem Unglück, doch wurden Hinweise von Untergebenen häufig ignoriert.

Darüber hinaus muss heute schriftlich im Detail festgelegt werden, welche Person auf der Bohrinsel die Entscheidungsbefugnis hat. Diese Person muss künftig über jeden Arbeitsschritt informiert werden. Genau das war bei der Zusammenarbeit der verschiedenen Dienstleister früher oft nicht der Fall. Entscheidungen wurden nicht immer klar abgestimmt oder von verschiedenen Personen getroffen. Wie im Fall der „Deepwater Horizon“ blieben Fehler so mitunter unbemerkt. Unabhängige Gutachter überprüfen heute vor Ort auf den Bohrinseln, ob die Entscheidungsgewalt klar geregelt ist. Untersucht wird auch, ob das Stoppkartenprinzip umgesetzt oder die Kommunikation verbessert wurde. Ob alle diese Maßnahmen ausreichend sind, um Unfälle zu vermeiden, wird sich in Zukunft zeigen.



1.38 > Lastkähne riegelten den Pontchartrain-See bei New Orleans ab.

Bemerkenswert ist, dass sich in den vergangenen drei Jahren eine neue Industrie entwickelt hat, die auf die Produktion und den Einsatz von Capping Stacks für die Tiefsee spezialisiert ist. Zum Teil handelt es sich dabei um etablierte Offshore-Firmen, zum Teil aber auch um Neugründungen. Außerdem haben sich verschiedene Ölkonzerne zusammengeschlossen und eigene Gesellschaften gegründet, die Personal und Capping-Technologie für den Ernstfall bereithalten oder weiterentwickeln. Diese soll im Bedarfsfall nicht nur im Golf von Mexiko zum Einsatz kommen, sondern weltweit. So haben die Unternehmen inzwischen unter anderem Stützpunkte in Stavanger in Norwegen, in Kapstadt in Südafrika, in Angra dos Reis bei Rio de Janeiro und in Singapur aufgebaut, in denen jeweils zwischen 6 und 10 Capping Stacks für den Notfall lagern. Ziel ist es, ein defektes Bohrloch innerhalb weniger Stunden oder Tage zu erreichen. Die Capping Stacks werden dann von Spezialschiffen auf den fehlerhaften BOP gesetzt. Anschließend kann das Öl aus dem Capping Stack kontrolliert zu einer Förderplattform geleitet werden. Inzwischen gibt es eine Reihe von Notfallplänen für Unfälle von „Deepwater Horizon“-Dimension. Diese wurden auf Drängen der US-Regierung zum Teil von mehreren Ölkonzernen gemeinsam ausgearbeitet und sind durchaus profund. Sie sehen auch den Einsatz von Halbtauerförderanlagen vor, die an die Unglücksstelle geschleppt werden sollen, um das Öl aus den Capping Stacks in Tanker zu pumpen.

Bis heute erforschen Biologen vor Ort, welche Folgen die Verölung des Wassers und der Küste im Detail hatte. In Feldstudien wird der Zustand der verschiedenen Organismen oder Lebensräume untersucht. Diese Feldarbeit wurde in 9 Arbeitspakete aufgeteilt: die Wassersäule und die Sedimente im Golf, die Uferbereiche, die Fischerei, Schildkröten und Delfine, Lebewesen im Übergangsbereich zwischen Land und Meer, Korallen, Krebse und Muscheln, Vögel und die Meeresvegetation.

Wie stark die Organismen und Lebensräume vom Ölunfall betroffen sind, ist zum großen Teil noch unklar. Die Schwierigkeit besteht darin, festzustellen, ob bestimmte Schäden an Pflanzen und Tieren tatsächlich



1.39 > Durch Wind, Wellen und Strömungen breitete sich das Öl aus.

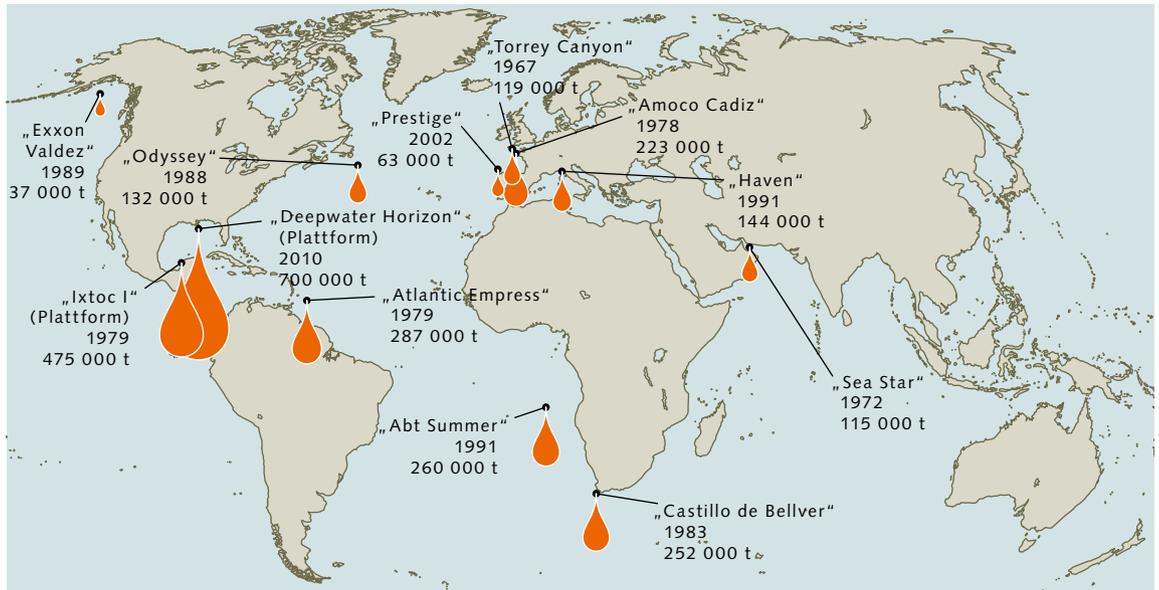
von Giften im Öl herrühren oder eventuell schon vorher da waren. Das Problem: Das betroffene Gebiet erstreckt sich über 5 US-Bundesstaaten und die dazugehörigen Meeresabschnitte. Das Areal ist also riesig. Außerdem wurde der Golf noch nie so intensiv untersucht wie heute. Für viele Gebiete oder auch Pflanzen- und Tierarten fehlt es schlicht an Daten, die aus der Zeit vor der Katastrophe stammen. Auch die Zahl der gestorbenen größeren Lebewesen ist bis heute unsicher. Nach Zählungen von US-Behörden sammelten Helfer an der besonders betroffenen US-Küste zwischen Louisiana und Alabama bis zum November 2010 rund 6000 Seevögel, 600 Meeresschildkröten und 100 Meeressäuger wie etwa Robben und Delfine ein, die offensichtlich durch das Öl getötet worden waren. Manche Experten gehen davon aus, dass bis zu 5-mal mehr Tiere gestorben sein könnten.

Darüber hinaus hat sich die Zahl der tot angespülten Tiere seit dem Unfall erhöht. Nach Angaben der National Wildlife Federation wurden zwischen 2007 und 2009 pro Jahr durchschnittlich 24 Meeresschildkröten tot angespült. 2011 waren es 525, 2012 354 und im Jahr 2013 mehr als 400. Die Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA zählte an den Stränden des Golfs zwischen 2002 und 2009 jährlich durchschnittlich 63 tote Delfine. 2010 waren es 229, 2011 335, 2012 158 und 2013 mehr als 200 Delfine. Was zu der höheren Todeszahl geführt hat, weiß man noch nicht mit Sicherheit. Unklar ist auch, wie stark das in der Tiefe am Bohrloch ausgetretene Öl die Lebensräume am Meeresboden geschädigt hat. Einige Forscher gehen davon aus, dass die Vermehrung und das Wachstum vieler Bodenorganismen für lange Zeit gestört sein werden. Andere Wissenschaftler sind der Meinung, dass die Auswirkungen des Öls geringer als erwartet sind, weil große Mengen des Öls relativ schnell durch Bakterien abgebaut worden sind.

Nicht bestätigt haben sich die Befürchtungen, dass Öl mit dem Golfstrom an Florida vorbei aus dem Golf von Mexiko bis über den Atlantik und sogar nach Europa treiben könnte. Relativ schnell wurde klar, dass die Ängste unbegründet waren. Das Öl blieb im Golf von Mexiko.

1.40 > Die Explosion der „Deepwater Horizon“ ist der größte Ölunfall aller Zeiten. Die Karte zeigt die 10 größten Unglücke und weitere Unfälle.

1.41 > Von der gesamten Ölmenge, die zwischen 1970 und 2009 weltweit bei Tankerunfällen freigesetzt wurde, entfällt der größte Teil auf die 1970er Jahre, der kleinste auf die Jahre 2000 bis 2009.



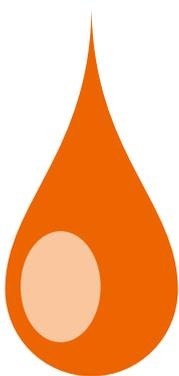
Ein Meilenstein war auch das Ölverschmutzungs-gesetz der USA (Oil Pollution Act, OPA). Es trat 1990 in Kraft – im Jahr nach der Havarie des Tankers „Exxon Valdez“, der im März 1989 im Prinz-William-Sund vor Alaska auf Grund gelaufen war. Damals wurde ein Küstenstreifen mit mehreren Vogelschutz- und Naturschutzgebieten auf einer Länge von rund 2000 Kilometern verschmutzt. Noch heute sind einige Gebiete durch Ölrreste belastet, die aufgrund der niedrigen Temperaturen nur schlecht abgebaut werden. Der Unfall führte dazu, dass die USA beim Meeresschutz die Initiative ergriffen und mit dem OPA noch vor anderen Staaten ein Gesetz für die eigenen Gewässer erließen. Demnach wurden Schiffe, die das Gebiet der Vereinigten Staaten befahren, regelmäßig überprüft, insbesondere was die Sicherheitsvorkehrungen und die Qualifizierung der Crew betrifft. Zudem wurde mit dem OPA in den US-Gewässern der Einsatz von Doppelhüllentankern verpflichtend. Vieles von dem, was der OPA vorschrieb, ist heute auch international gültig, etwa eine zuverlässige Funktechnik für die Verständigung an Bord sowie ein Schiffserkennungssystem, mit dem die Verkehrsüberwachungsbehörden jederzeit den Kurs und die Position eines Schiffs abrufen können.

Eine ausführliche Analyse der Tankerunglücke der 1980er Jahre führte schließlich dazu, dass die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime

Organization, IMO) in London 1994 den ISM-Code (International Safety Management Code, vollständig: International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention) verabschiedete. Es hatte sich gezeigt, dass Fehler der Besatzung oftmals zu schweren Unfällen geführt hatten. Der ISM-Code enthält daher vor allem Vorschriften für den sicheren Betrieb eines Schiffs und soll damit zum Schutz der Menschen an Bord und der Umwelt beitragen. Nach dem ISM-Code muss ein Schiffsbetreiber unter anderem sicherstellen, dass seine Schiffsbesatzungen gut ausgebildet und körperlich fit sind, und zudem regelmäßig Notfalltrainings absolvieren. Damit sollen Unfälle vermieden werden.

Besser gemeinsam als allein

Trotz dieser Abkommen aber funktionierte die grenzüberschreitende Bekämpfung von Ölunfällen lange Zeit nicht. Zwar verabschiedeten bereits 1969, 2 Jahre nach dem Unfall der „Torrey Canyon“, Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, die Niederlande, Norwegen und Schweden in Bonn das Bonn-Übereinkommen, nach dem man bei künftigen Notfällen kooperieren wollte. 1983 traten die Europäische Union und mit ihr weitere europäische Staaten als Vertragspartner bei. Doch lange fehlte es an gut abgestimmten Notfallplänen, um große



1970er: 56%



1980er: 20,5%



1990er: 19,8%



2000er: 3,7%

Ölmengen systematisch zu bekämpfen. Noch vor wenigen Jahren waren die Zuständigkeiten oft unklar.

Ein Beispiel war der Fall des Frachtschiffs „Pallas“, das 1998 in der Nordsee in Brand geriet. Deutsche und dänische Rettungskräfte holten zwar die Crew von Bord, ließen das Schiff aber im Sturm führungslos zurück. Die „Pallas“ trieb aus dem dänischen ins deutsche Hoheitsgebiet. Die deutschen Behörden wiederum waren sich uneins darüber, welche Institution für die „Pallas“ zuständig ist. Schließlich strandete das Schiff im deutschen Wattenmeer. Glücklicherweise liefen nur 90 Tonnen Öl aus. Dennoch wurden zahlreiche Seevögel und einige Quadratkilometer des empfindlichen Wattenmeers verölt. In Deutschland wurde in der Folge das Havariekommando gegründet, eine Einsatzzentrale, die heute sowohl für Gefahrgut- und Ölunfälle auf See als auch für Schiffsbrände zuständig ist. Das Havariekommando dirigiert auch den Einsatz großer Hochseeschlepper, die in den vergangenen Jahren an der Nord- und Ostseeküste stationiert worden sind. Diese starken Fahrzeuge können Schiffe mit Maschinenschaden abschleppen und so verhindern, dass diese wie die „Pallas“ auf Grund laufen und leckschlagen.

Auch die internationale Zusammenarbeit klappt heute besser, denn mittlerweile gibt es entsprechende Notfallpläne, die jedes Jahr mit mehrtägigen internationalen Ölbekämpfungübungen trainiert werden. Dabei sind bis zu 50 Schiffe aus verschiedenen Nationen im Einsatz. So kommen zum Beispiel in der Nordsee Schiffe aller Anrainerstaaten zur Bonnex-Übung (Bonn Convention Exercise) zusammen.

Der Schutz der Ostsee wird nach der Helsinki-Konvention geregelt, die im Jahr 2000 in Kraft trat. Auch diese sieht eine Übung aller Anrainerstaaten vor. Diese sogenannte Balex (Baltic Exercise) findet jedes Jahr im Sommer in einem anderen Ostseegebiet statt. In den Notfallplänen ist unter anderem geregelt, auf welchen Wegen Informationen weitergeleitet werden, etwa per E-Mail, Funk oder Telefax, und wer Entscheidungen trifft. Ferner ist festgelegt, wann welche Schiffe zum Einsatz kommen.

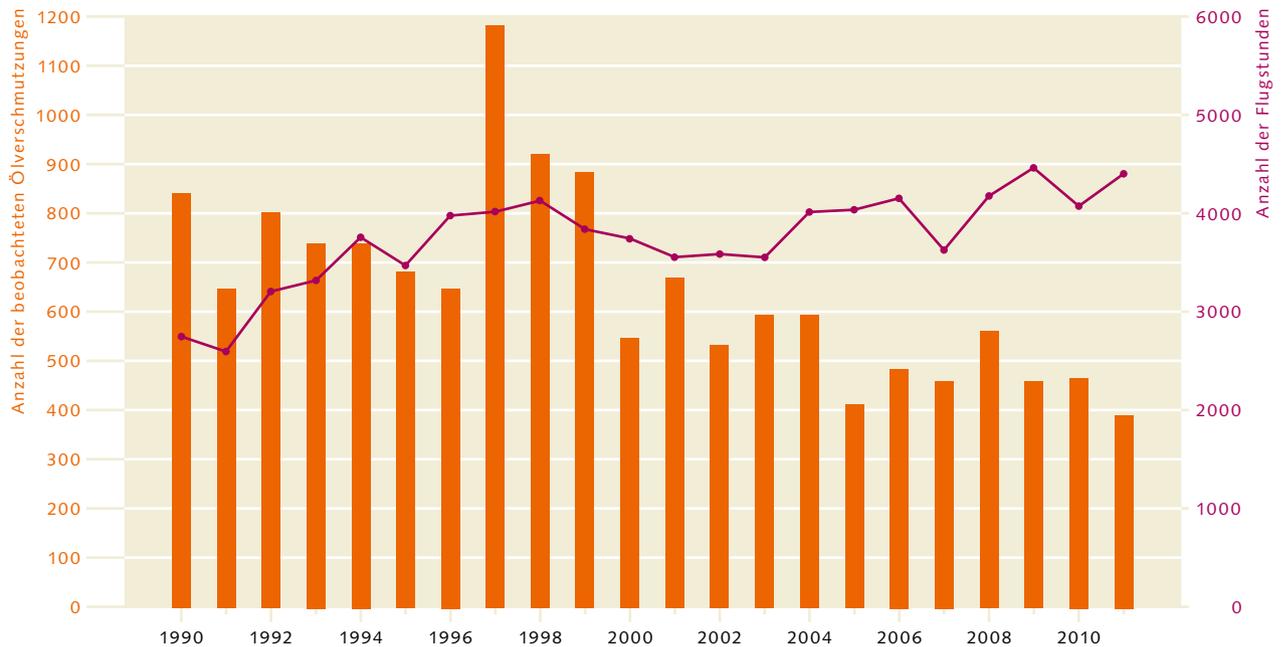
Für den Schutz des Mittelmeers gibt es entsprechend zu den Abkommen für die Nord- und Ostsee das Übereinkommen von Barcelona, das 1976 in Kraft trat. Im selben Jahr wurde auf Malta ein regionales Notfallzentrum für den Schutz des Mittelmeers (Regional Marine Pollution

Das MARPOL-Übereinkommen

Das MARPOL-Übereinkommen ist eine weltweit geltende Konvention, mit der die Verschmutzung der Meere durch die Schifffahrt deutlich verringert wurde. Es wurde 1973 von der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO) verabschiedet. 1978 wurde das Übereinkommen noch einmal erweitert, woher die Bezeichnung MARPOL 73/78 stammt. Es besteht aus einem allgemeinen Vertragswerk und mehreren Anhängen. Während das Vertragswerk nur allgemeine Regeln und den Anwendungsbereich definiert, enthalten die Anhänge klare Vorschriften für den Umgang mit Abwasser, Müll, Öl und Schadstoffen auf Schiffen. Anhang 1 regelt den Umgang mit Öl und trat im Oktober 1983 in Kraft. Er schreibt unter anderem vor, Auffanganlagen für Altöl in Häfen zu installieren, und regelt die Einführung von Doppelhüllentankern. Gemäß Anhang 1 muss die Besatzung zudem ein Öltagebuch führen, in dem der Verbleib sämtlicher Mengen an Öl und ölverschmutztem Wasser an Bord protokolliert wird.

Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea, REMPEC) etabliert, das nicht nur für Öl, sondern auch für andere Verschmutzungen zuständig ist. Eines seiner Ziele war es zunächst, in den Anrainerstaaten technisches Know-how für die Bekämpfung von Verschmutzungen aufzubauen. REMPEC organisiert auch Übungen, die allerdings nicht so regelmäßig wie in Nordeuropa abgehalten werden. Zudem nehmen meist nicht alle Mittelmeeranrainer an den Übungen teil, sondern nur Staaten aus einer bestimmten Mittelmeerregion. Veranstaltet werden zudem Workshops, die sich aber ebenfalls meist an Anrainer einer bestimmter Region richten – an solche im europäischen oder im arabischen Raum.

Die Geschichte der Ölunfälle zeigt, dass viele der erwähnten Maßnahmen erst nach schweren Unfällen ergriffen wurden. Das gilt auch für die Ölbekämpfung in Südostasien. Am 7. Dezember 2007 rammte ein Schwimmkran vor dem südkoreanischen Nationalpark Taeanhaean den Tanker „Hebei Spirit“. Das Schiff schlug leck und verlor 11 000 Tonnen Öl. Binnen weniger Stunden breitete sich der Ölteppich kilometerweit aus. Er verschmutzte die Touristenstrände und vergiftete Muschelzuchten. Experten schätzen, dass der Unfall einen Schaden von etwa 250 Millionen Euro verursacht hat. Schon 1994 hatten Südkorea und die Nachbarstaaten China, Japan und Russland mit dem Northwest Pacific Action Plan (NOWPAP)



1.42 > Die Zahl der Ölverschmutzungen im Bereich der Nordsee hat sich seit 1990 halbiert.

ein Abkommen zum Schutz der Meeresregion unterzeichnet, ein gemeinsamer Notfallplan aber fehlte. 11 Tage nach dem Unfall der „Hebei Spirit“ besserte man nach: Auf Drängen Südkoreas verabschiedeten die Mitgliedsstaaten den Regional Oil Spill Contingency Plan. Seitdem haben die Länder mehrere gemeinsame Ölbekämpfungsübungen abgehalten, zuletzt China und Südkorea im Mai 2012 vor der südkoreanischen Küste.

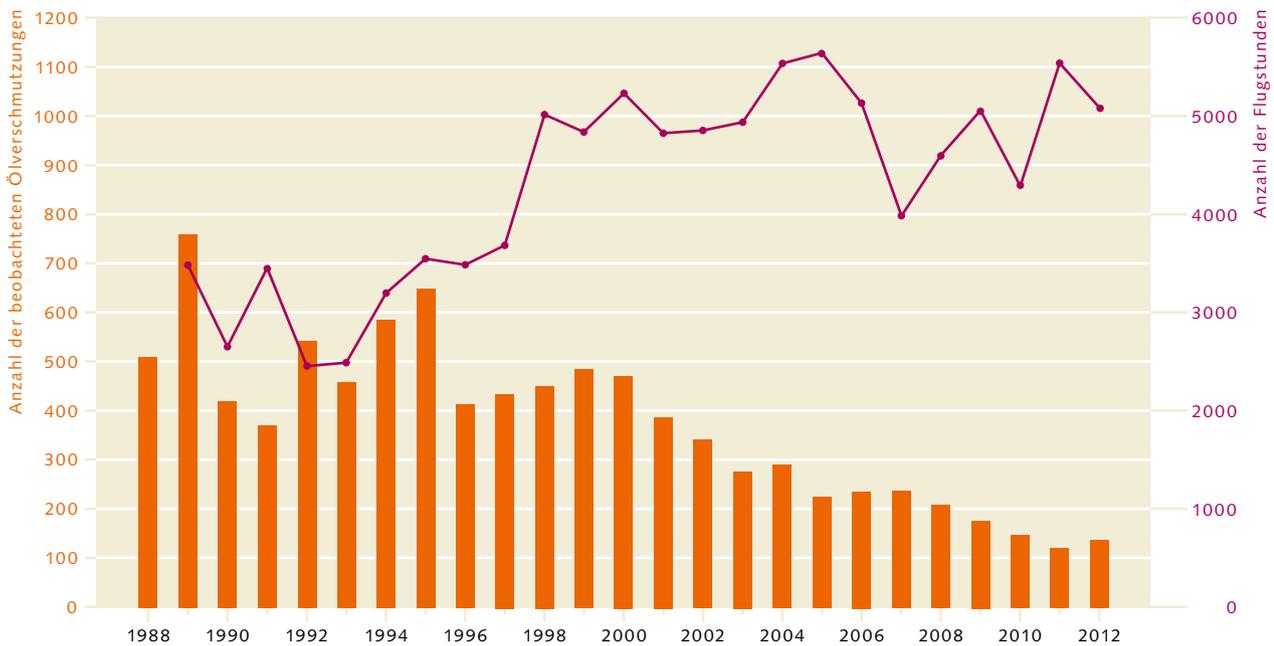
In den Erdöl exportierenden Entwicklungsländern ist man zum Teil noch nicht ganz so weit. Das gilt beispielsweise für die west- und südwestafrikanischen Staaten. Zwar hat man in den vergangenen Jahren in vielen dieser Nationen Notfallpläne ausgearbeitet, doch fehlt es oft an einer stringenten Koordination sowie an technischer Ausrüstung. Gemäß einer internationalen Studie mangelt es selbst in den wichtigen Ölexportnationen Kamerun, Ghana, Nigeria und Angola an Spezialschiffen. In Kamerun und Ghana stehen für den Notfall nur kleine Schlepper und einige Ölsperren zur Verfügung. Angola und Nigeria haben gar keine eigene Notfallausrüstung. Diese soll gemäß Notfallplan bei Bedarf von den Ölfirmen gestellt werden. Dazu zählen Geräte zum Säubern der Küste wie etwa Lkws mit Saugtechnik. Hinzu kommen Sprühanlagen für Dispergatoren, die man im Notfall mit gecharterten Schiffen oder Hubschraubern verteilen will.

Problematisch ist laut Studie darüber hinaus, dass es in vielen west- und südwestafrikanischen Staaten zwar Notrufnummern gibt, diese aber oft nicht funktionieren. Zudem verläuft der Austausch von Dokumenten und Informationen zwischen den beteiligten Behörden und Institutionen schleppend. Zum Teil sind auch die Informationen lückenhaft. Das erschwert im Notfall eine gute Koordination aller Beteiligten.

In anderen Staaten West- und Südwestafrikas ist die Lage noch ernüchternder. 6 Staaten haben gar keine Notfallpläne. In anderen fehlt es an Selbstverständlichkeiten wie einer zentralen Notrufnummer oder einer entsprechenden Sprechfunkfrequenz. Insofern ist fraglich, ob diese Nationen einen großen Ölunfall aus eigener Kraft bekämpfen können.

Überwachungsflüge gegen Umweltsünder

Auch im Hinblick auf die schleichende Verölung der Meere durch die Schifffahrt hat sich die Situation in verschiedenen Regionen der Welt verbessert. Dazu beigetragen hat wiederum das MARPOL-Abkommen. So wurden mit MARPOL weltweit 7 Meeresregionen zu sogenannten Sondergebieten erklärt, die unter besonderem Schutz stehen. So dürfen diese Gebiete nur von solchen Tankern



durchfahren werden, die bestimmte Sicherheitsstandards einhalten, die beispielsweise die Größe der einzelnen Tanks im Schiffsrumpf beschränkt haben, um zu verhindern, dass bei einem Unfall und bei einer Beschädigung des Rumpfes große Ölmengen freigesetzt werden. Die Sondergebiete sind:

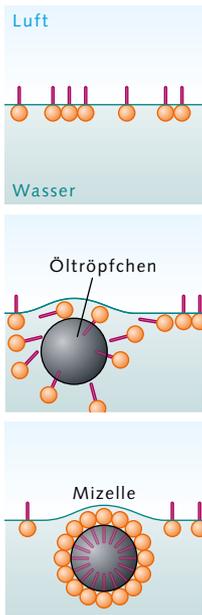
- die Antarktis (seit 1992),
- die arabisch-persische Golfregion (seit 2008),
- das Mittelmeer (seit 1983),
- die Nordsee beziehungsweise die nordwesteuropäischen Gewässer (seit 1999),
- die Ostsee (seit 1983),
- das Schwarze Meer (seit 1983),
- die südlichen südafrikanischen Gewässer (seit 2008).

In mehreren dieser Sondergebiete, etwa dem Mittelmeer oder der Nord- und Ostsee, werden seit vielen Jahren Überwachungsflüge durchgeführt. Da sich Ölverschmutzungen aus dem Flugzeug mit Spezialekameras sehr gut identifizieren lassen, kann man Schiffe, deren Besatzung die Tanks auf See gereinigt oder Öl abgelassen hat, schnell entdecken. Da Umweltsünder im Bereich der Sondergebiete strafrechtlich verfolgt werden, haben die Flüge abschreckende Wirkung, sodass die Zahl der illegalen Ein-

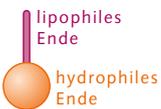
leitungen deutlich gesunken ist. Schwarze Ölkümpfen, die man in den 1980er Jahren noch häufig am Strand fand, sind heute in Westeuropa selten. Seit einigen Jahren wird die Suche nach Verölungen zusätzlich auch durch Satellitendaten unterstützt, doch sind solche Daten in manchen Fällen noch zu ungenau. So werden mitunter auch Algenblüten als Ölteppich interpretiert. Viele Behörden überprüfen einen Verdacht daher in der Regel per Befliegung. Die Satellitenbeobachtung hat aber den Vorteil, dass durch den Blick aus dem Weltraum große Meeresgebiete leicht erfasst werden können. In China und einigen europäischen Ländern gibt es Forschungsprojekte, die das Ziel haben, die Datenauswertung zu verbessern. In Norwegen wurde außerdem ein Kooperationsprogramm aufgesetzt, in dem das Militär, Umweltschutzbehörden, meteorologische Institute sowie Hochschulen gemeinsam untersuchen sollen, inwieweit sich Satellitendaten künftig für die Überwachung der heimischen Hoheitsgewässer nutzen lassen.

Obwohl es in Europa einen eindeutig positiven Trend gibt, ist die Zahl der Ölverschmutzungen hier im internationalen Vergleich noch relativ hoch. Die Ursache ist der starke Handelsschiffsverkehr, insbesondere im Ärmelkanal, der immer wieder zu Verdreckungen führt. Nur in Asien gibt es noch mehr Ölverschmutzungen, hier vor

1.43 > In der Ostsee nahm die Zahl der Verschmutzungen sogar um fast drei Viertel ab. Dass sich die Lage in den nordeuropäischen Gewässern verbessert hat, führen Fachleute unter anderem auf die abschreckende Wirkung von Überwachungsflügen zurück.



Tensidmolekül



1.44 > Für die Öl-bekämpfung werden auch Tenside eingesetzt. Diese Moleküle haben ein hydrophiles Ende, das sich zum Wasser orientiert, und ein lipophiles Ende, das ins Öl taucht. Sie sind dadurch in der Lage, kleine Öltröpfchen einzuschließen beziehungsweise größere Ölmengen aufzulösen.

allein in der Straße von Malakka zwischen Indonesien und Singapur. In den chinesischen Gewässern hat die Zahl der Verunreinigungen in den vergangenen Jahren sogar zugenommen, weil dort aufgrund des Wirtschaftswachstums und der zunehmenden Ex- und Importe deutlich mehr Schiffe unterwegs sind. In den USA wiederum hat die Menge des Öleintrags in die Umwelt seit 1990 stark abgenommen. Dies ist nach Aussage der US-Behörden vor allem auf die strengen Vorgaben durch den Oil Pollution Act zurückzuführen.

Die Grenzen der Öl-bekämpfung

Gelangt Rohöl ins Wasser, breitet es sich zunächst zu einem dünnen Film auf der Wasseroberfläche aus. Je nach Temperatur verdampfen dabei vor allem sogenannte leicht flüchtige Bestandteile des Öls wie etwa Benzol innerhalb weniger Stunden. Diese können 30 bis 50 Prozent der ursprünglichen Ölmenge ausmachen.

Darüber hinaus wird das Öl durch Sauerstoff und die ultraviolette Strahlung der Sonne chemisch verändert. Letztlich bildet sich innerhalb weniger Tage ein zäher Ölschlack, der vor allem aus großen Kohlenwasserstoffmolekülen besteht. Im Detail tragen folgende Faktoren zur chemischen und physikalischen Veränderung des Öls in den ersten Stunden und Wochen bei:

- Verdunstung von flüchtigen Ölbestandteilen;
- Ausbreitung des ausgelaufenen Öls in Form von Ölteppichen, die auf der Wasseroberfläche treiben;
- Bildung von Dispersionen (kleine Öltröpfchen in der Wassersäule) und Emulsionen (größere Öltröpfchen in Wasser oder Wasser in Öl);
- Photooxidation (molekulare Veränderung von Ölbestandteilen durch das Sonnenlicht) und Lösung.

Hat sich das Öl erst einmal chemisch und physikalisch verändert, lässt es sich fatalerweise kaum noch mit Öl-bekämpfungsschiffen von der Wasseroberfläche saugen. Zum Teil sinkt es zu Boden. Daher ist es bei Ölunfällen besonders wichtig, dass schnell gehandelt wird.

In Westeuropa setzt man bei der Öl-bekämpfung vor allem auf Spezialschiffe, die das Öl-Wasser-Gemisch mit Schwenkarmen (sweeping arms) von der Oberfläche

schöpfen und dann in den Schiffsrumpf saugen. Bis in die 1990er Jahre war die Kapazität dieser Schiffe allerdings gering, und sie waren schnell vollgepumpt. Seit etwa 15 Jahren aber sind viele Schiffe mit Ölabscheidern ausgestattet, die das Öl vom Wasser abtrennen und das gereinigte Wasser ins Meer zurückpumpen können. Entsprechend sind die Schiffe in der Lage, mehr Öl aufzunehmen. Ihre Einsatzmöglichkeit ist allerdings begrenzt, denn bei starkem Wind und Wellengang können die dünnen Schwenkarme nicht ausgeklappt werden. Seit einigen Jahren arbeiten deutsche Forscher daher an einem seegangsunabhängigen Ölskimmer (SOS). Dieses Doppelrumpfbboot soll auch bei Sturm und hohen Wellen in einen Ölteppich hineinfahren und das Öl vom Wasser abschöpfen können.

Um die Bildung von Ölschlack zu verhindern, können auch Dispergatoren verwendet werden. Diese Substanzen lösen Ölteppiche nach demselben Prinzip auf wie ein Spülmittel das Speisefett. Die Dispergatoren enthalten Tenside. Diese haben sowohl ein fettliebendes (lipophiles) als auch ein wasserliebendes (hydrophiles) Molekülende. Dadurch können sie sich zugleich an Fette wie an Wassermoleküle anlagern. Damit sind sie in der Lage, den Ölteppich in feine Tröpfchen aufzulösen, die sie wie eine Hülle umschließen und isolieren. Fachleute nennen diese Tröpfchen Mizellen. Der Vorteil: Bakterien können die vielen kleinen Mizellen sehr viel besser abbauen als einen zusammenhängenden Ölteppich.

Nach der verheerenden Explosion der Plattform „Deepwater Horizon“ wurden große Mengen an Dispergatoren eingesetzt. Zum einen wurden sie mit Flugzeugen versprüht, zum anderen im Wasser am Meeresboden direkt mit dem Öl vermischt, das aus dem Bohrloch austrat. Kritiker halten die Dispergatoren deshalb für problematisch, weil manche Tenside giftig sind. Die Befürworter wiederum führen ins Feld, dass die Tenside im Wasser sehr stark verdünnt werden und somit für Meeresorganismen ungefährlich sind. Für die Verfechter überwiegen die Vorteile der Dispergatoren bei der Öl-bekämpfung die möglichen Umweltrisiken bei Weitem.

Allerdings hat auch der Einsatz der Dispergatoren seine Grenzen. Bei Sturm lassen sich die Mittel kaum gezielt versprühen. Zudem dürfen Flugzeuge dann oftmals gar nicht erst starten.



1.45 > Während einer Ölbekämpfungsübung vor Helsinki fängt das Mehrzweckschiff „Hylje“ mit einem Schwenkarm einen Spezialschaum ein, der Öl simulieren soll.

Auch heute noch können große Ölverschmutzungen nur unzureichend bekämpft werden. Für Notfallexperten ist daher die Vermeidung die beste Strategie. Zur Vorsorge gehört unter anderem, die Schiffsverkehrswege mit moderner Verkehrsleittechnik und gut ausgebildeten Lotsen zu überwachen. Außerdem haben die Schiffseigner dafür zu sorgen, dass die Schiffe technisch gut in Schuss sind und die Mannschaft hoch qualifiziert ist.

Gefährdete Küsten

Erdöl ist ein natürliches Stoffgemisch, das auf biologischem Weg von Bakterien abgebaut wird. Diese Bakterien sind vor allem dann aktiv, wenn folgende Bedingungen gegeben sind:

- hohe Temperaturen (fördert Bakterienaktivität);
- feine Verteilung des Öls (gegebenenfalls Bildung von Dispersionen durch den Einsatz von Dispergatoren), sodass eine große Oberfläche entsteht, an der Bakterien angreifen können;

- gute Versorgung mit Sauerstoff;
- gute Versorgung mit weiteren wichtigen Nährstoffen;
- geringe Menge an Fressfeinden, die die Zahl der Bakterien reduzieren würden.

Da der bakterielle Abbau durch niedrige Wassertemperaturen stark verlangsamt wird, sind Ölkatastrophen in Kaltwassergebieten besonders schwerwiegend. So findet man zum Beispiel in den Bodenschichten am Ufer des Prinz-William-Sunds auch heute noch an vielen Stellen Reste des Öls, das bei der Havarie der „Exxon Valdez“ angespült wurde. In manchen Fällen ist das Öl mehrere Zentimeter tief in den Boden eingedrungen.

Wie schnell verschmutzte Küstengebiete vom Öl befreit werden, hängt aber auch von der Art des Küstenabschnitts ab. Stark umspülte Fels- und Sandküsten sind durch die Wasserströmungen und Wellen meist innerhalb weniger Monate, in seltenen Fällen im Laufe weniger Jahre wiederhergestellt. Sandstrände sind unterschiedlich stark betroffen. Sofern sie grobkörnig sind, kann das Öl tief eindringen, was den Abbau verlangsamt. Stark um-



1.46 > Im Monat nach dem Untergang der „Deepwater Horizon“ sammelten sich Öltropfen am Strand von Grand Terre Island vor Louisiana.

spülte Strände wiederum sind meist schneller wieder sauber als weite flache Gebiete mit geringer Strömung.

Problematisch sind Ölverschmutzungen vor allem in Mangrovenwäldern, die einzigartige, artenreiche Lebensräume sind. Unter der Ölschicht sterben die Pflanzen ab. Mit ihnen gehen die Habitate vieler anderer Tier- und Pflanzenarten verloren. Hinzu kommt, dass das Öl tief in das weiche Sediment der Mangrovenwälder eindringt, wo es lange bleibt. Ähnlich betroffen sind Salzwiesen. Auch hier bilden die Pflanzen charakteristische und zugleich seltene Lebensräume mit speziell angepassten Organismen. Diese Ökosysteme gehen verloren, wenn die Pflanzen durch das Öl vernichtet werden.

Besonders gefährdet sind ferner Weichböden und Platten, wie man sie im Wattenmeer an der Nordseeküste findet. Hier leben die meisten Tiere im oder auf dem Boden und sind daher durch einen Ölteppich besonders stark bedroht. Mangroven, Salzwiesen und Weichböden benötigen zwischen 2 und mehr als 20 Jahren, um sich von einer Verölung zu erholen. In derart empfindlichen Lebensräumen können also auch kleinere Verölungen zu einem großen Problem werden.

Als besonders bedroht sehen Umweltschützer zudem die arktischen Gewässer an, denn die Anrainerstaaten planen, in Zukunft in der Arktis nach Öl zu bohren. Vor allem Russland und die USA haben Ambitionen, die Erdgas- und Erdölreserven im Norden zu erschließen. Doch die Förderung ist schwierig. Driftendes Eis könnte Bohr- und Förderanlagen zerstören. Darüber hinaus könnten Tanker im Eis havarieren.

Als die Firma Shell im Jahr 2012 zum ersten Mal nach 20 Jahren in Alaska Probebohrungen durchführte, sah sie sich massiven Protesten der Umweltschutzverbände ausgesetzt. Diese warnten vor den besonderen Risiken des Bohrens im Meereis, vor möglichen Tankerunfällen und vor den Folgen einer Ölkatastrophe.

Die Arktis ist nach wie vor in weiten Teilen ein natürlicher Lebensraum mit einzigartigen und weitgehend unberührten Ökosystemen, die durch das Öl massiv geschädigt werden könnten. Nicht zuletzt, weil sich das Öl im Eis kaum bekämpfen lässt und in der Kälte fast gar nicht abgebaut wird. Tatsächlich gab es während des Bohrprogramms Probleme. Geräte wurden durch das Eis beschädigt. Zu guter Letzt lief die Bohrinsel „Kulluk“ auf

Grund. Für 2013 sagte das Unternehmen weitere Bohrungen ab, nachdem das Unterfangen in einem staatlichen Bericht in den USA an den Pranger gestellt worden war. Darin hieß es, dass die Sicherheitsstandards für die Bohrvorhaben in der Arktis nicht ausreichend sind.

Im Frühjahr 2013 unterzeichnete Shell einen Kooperationsvertrag mit dem russischen Energieunternehmen Gazprom für eine Ölförderung in der russischen Arktis. Kritiker fürchten, dass die Sicherheitsstandards dort noch niedriger sind, und warnen vor einem großen Ölunfall. Wie sich die Exploration oder Förderung von Öl in der US-amerikanischen Arktis weiterentwickelt, ist schwer einzuschätzen. In den USA streiten derzeit Industrieunternehmen und Umweltschutzverbände darüber, wie stark die Arktis geschützt werden soll. Industrieverbände warnen vor zu strengen staatlichen Sicherheitsvorschriften, die die Ölförderung wirtschaftlich unrentabel machen würden. Umweltschutzverbände fordern, die Ölförderung in der Arktis ganz zu verbieten. Experten gehen davon aus, dass die Ölkonzerne in den USA die arktischen Ölreserven weiter im Blick haben. Spätestens wenn in den Ausschließlichen Wirtschaftszonen anderer Staaten wie etwa Russland große Ölreserven entdeckt werden, würden auch die US-Unternehmen ihre Bemühungen forcieren, heißt es.

Küsten schützen oder aufgeben?

Nach großen Unfällen bilden sich oft riesige Ölteppiche, die eine Ausdehnung von mehreren Hundert Kilometern haben. In solchen Situationen ist es unmöglich, die gesamte Küste zu schützen. Die Einsatzkräfte müssen sich deshalb auf die empfindlichsten und wichtigsten Küstenabschnitte beschränken. Als besonders schützenswert gelten Naturschutzgebiete oder Bereiche, in denen seltene Pflanzen- und Tierarten leben. Auch wirtschaftlich bedeutende Zonen wie etwa Fisch- oder Muschelzuchtanlagen werden bevorzugt geschützt. Für viele Gebiete der Welt gibt es heute Karten mit Sensitivitätsabstufungen, in denen genau verzeichnet ist, wie empfindlich verschiedene Küstenabschnitte auf Ölverschmutzungen reagieren. Diese Sensitivitätsabstufungen enthalten außerdem Informationen darüber, wo welche Pflanzen- und Tierarten vorkommen. Entscheidend ist, wie selten eine Art ist, wie

1.47 > Wasservögel gehören zu den prominentesten Opfern einer Ölkatastrophe. Dieser Reiher war durch das Öl der „Deepwater Horizon“ stark verklebt.



stark sie durch einen Ölunfall bedroht wäre und wie wahrscheinlich es ist, dass sie vor Ort ausstirbt. Oft sind nicht Seevögel oder Meeressäuger am stärksten bedroht, sondern seltene Pflanzen- oder auch Insektenarten. Alle diese Informationen werden unter anderem für die Notfallpläne verwendet. Die Einsatzkräfte werden heute auch durch spezielle Computerprogramme unterstützt, die auf die Datenbanken mit den Sensitivitätsdaten zurückgreifen. Sie sind in der Lage, diese Informationen mit aktuellen meteorologischen Angaben zu verknüpfen und daraus zu errechnen, wohin der Ölteppich treiben wird und ob wichtige Gebiete berührt werden. So können die Einsatzkräfte die Ölbekämpfungsschiffe gezielt zu den besonders schützenswerten Gebieten dirigieren oder Ölsperren auslegen lassen.

Wie Erdöl Pflanzen und Tiere schädigt

Wie sich das Öl auf Pflanzen und Tiere auswirkt, weiß man heute aufgrund zahlreicher Ölunfälle sehr genau. Besonders auffällig ist die Verschmutzung des Gefieders von Wasservögeln. Es verliert durch das Öl seine wasserabweisende und isolierende Wirkung. Der Vogel kühlt aus und stirbt. Auch Meeressäuger wie etwa Otter können an Unterkühlung sterben, wenn ihr Fell verklebt. Darüber hinaus schlucken Vögel und Säugetiere beim Putzen Öl,

wodurch sie vergiftet werden können. Fische nehmen die giftigen Kohlenwasserstoffe über ihre Kiemen oder die Haut auf. Bei Pflanzen verhindert die Ölschicht den Gasaustausch über die Blätter und den Nährstofftransport in die Wurzeln. Die Pflanzen gehen ein.

Muscheln und andere Tiere, die Wasser nach Nahrungspartikeln durchsieben, nehmen das Öl mit dem Nahrungsstrom auf. Die giftigen Verbindungen im Öl und die Verklebung des Filterapparats führen meist schnell zum Tod. Sofern die Muscheln die Ölverschmutzung überleben, können die Giftstoffe später in die Nahrungskette gelangen, wenn die Muscheln gefressen werden. Die Wirkung der giftigen Kohlenwasserstoffe ist von Tierart zu Tierart verschieden. Experimente mit Krebsen oder Muscheln zeigen, dass bei ihnen vor allem der Stoffwechsel und das Wachstum beeinträchtigt werden. Bei anderen Organismen wird die Fortpflanzung gestört. So kann eine Vergiftung durch Öl zu genetischen Schäden führen. Bei Heringen etwa waren zahlreiche frisch geschlüpfte Nachkommen missgebildet. Hinzu kommt bei vielen Meerestieren ein Orientierungsverlust, denn viele Organismen finden sich in ihrer Umwelt zurecht, indem sie feinste Konzentrationen bestimmter Substanzen im Wasser wahrnehmen. Manche Kohlenwasserstoffe stören diese Wahrnehmung und erschweren damit die Suche nach Nahrung oder Sexualpartnern.

Weniger Ölverschmutzung im Meer – trotz steigenden Energiebedarfs

Ungeachtet der weltweiten Diskussion um den Klimawandel und den Ausstoß von Kohlendioxid, verbrauchen die Menschen weltweit von Jahr zu Jahr mehr Energie. Seit Anfang der 1970er Jahre hat sich der globale Energiebedarf verdoppelt, bis zum Jahr 2035 wird er sich noch einmal um rund ein Drittel erhöhen. Die Ursachen für den wachsenden Energiehunger sind insbesondere das Bevölkerungswachstum in Asien sowie die fortschreitende Industrialisierung in den Schwellenländern.

Die fossilen Rohstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas werden nach Einschätzung von Fachleuten trotz des Ausbaus erneuerbarer Energien weiterhin den größten Teil der Energie liefern. Während Kohle und Erdgas die Nachfrage noch bis weit über dieses Jahrhundert hinaus decken können, dürfte die Ölproduktion bis 2050 abnehmen. Schon heute sind viele ehemalige Lagerstätten am Land und in den flachen Meeresgebieten weitgehend ausgebeutet. Mit tertiären Förderverfahren, bei denen Heißwasser oder Flüssigkunststoffe in die Lagerstätten eingepresst werden, um das restliche Öl herauszudrücken, versucht man die Ausbeute zu erhöhen. Darüber hinaus strebt die Branche in immer größere Tiefen. Zwar ist die Gas- und Ölförderung in der Tiefsee rund 4-mal teurer als im Flachwasser, doch mit steigendem Ölpreis wird diese Förderung wirtschaftlich. Öl wird heute bereits aus einer Wassertiefe von mehr als 2900 Metern gewonnen. Beim Erdgas liegt der Tiefenrekord bei 2700 Metern.

Um Erdöl und Erdgas zu gewinnen, werden verschiedene Typen von Plattformen eingesetzt. Beim Bohren kommen meist spezielle Bohrplattformen zum Einsatz, die nach Ende der Bohrarbeiten durch Förderplattformen ersetzt werden. In vielen Regionen benutzt man heute außerdem Förderanlagen, die direkt auf den Meeresboden gesetzt werden. Bei

solchen sogenannten Subsea-Vorrichtungen werden Kompressoren, Pumpen oder Stromversorgungsmodule am Meeresboden zu einer einzigen Gesamtanlage zusammengeschlossen.

Wie die Explosion der Bohrplattform „Deepwater Horizon“ im Jahr 2010 zeigt, ist die Ölgewinnung in der Tiefe eine besondere Herausforderung. Es dauerte ganze 3 Monate, um das Leck am Meeresboden abzudichten. So tragisch Ölkatastrophen von solchem Ausmaß sind: Derart spektakuläre Unfälle sowie Tankerhavarien tragen heute im Durchschnitt nur mit etwa 10 Prozent zur Verölung der Ozeane bei. Problematischer ist vielmehr die Verschmutzung der Meere durch die sogenannte schleichende Ölpest, also die chronische Verschmutzung aus vielen kleinen Quellen. Dazu zählt Öl, das durch die Schifffahrt ins Meer gelangt, beispielsweise durch illegale Tankreinigungen oder Unachtsamkeit beim Verladen. Wie die europäischen Staaten in der Vergangenheit gezeigt haben, lässt sich die Zahl dieser Verschmutzungen aber durch intensive Überwachungsflüge der Küstengewässer reduzieren, und erfreulicherweise hat die Ölverschmutzung der Meere in den vergangenen Jahrzehnten weltweit abgenommen.

Dazu haben vor allem internationale Meeresschutzabkommen und Konventionen beigetragen. Mit ihnen wurden beispielsweise Tanker mit einer doppelten Außenhaut zur Pflicht. Außerdem wurde die Überwachung der Schifffahrtswege durch wirkungsvollere Radartechnik und Schiffserkennungssysteme deutlich verbessert. In vielen Ländern gibt es heute darüber hinaus ausgefeilte Notfallpläne, nach denen man nach Havarien die Ölbekämpfung organisiert und international koordiniert.

Trotz dieses positiven Trends ist die Ölmenge, die weltweit jedes Jahr in die Ozeane gelangt, mit derzeit rund 1 Million Tonnen noch viel zu hoch, weil dadurch weiterhin viele marine Lebensräume und Organismen vergiftet werden.

2 Tagebau am Meeresgrund



> Diamanten, Kies und Sand fördert man bereits seit Jahrzehnten aus küstennahen Gewässern. Um den wachsenden Bedarf an Metallen zu decken, sollen künftig Erze in Form von Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfiden in bis zu 4000 Meter Tiefe abgebaut werden. Ob und wann dieser Meeresbergbau beginnt, hängt von den Metallpreisen am Weltmarkt ab. Die Arbeit in der Tiefe ist heute noch unwirtschaftlich. Zudem fehlt es bislang an Abbaugeräten.



Rohstoffe für die Welt

> **Metalle und Industriemineralien für die Herstellung von Konsumgütern und Maschinen werden heute fast ausschließlich an Land gewonnen. Um sich von Importen unabhängig zu machen und sich gegen zukünftige Engpässe bei der Rohstoffversorgung abzusichern, überlegen einige Staaten, solche Rohstoffe künftig auch aus dem Meer zu gewinnen. Doch noch ist der Bergbau unter Wasser zu teuer und mögliche Umweltauswirkungen sind nicht klar.**

Erz, Glimmer, Sand und Kies

Für Hochtechnologieanwendungen und moderne elektronische Massenprodukte wie Fotovoltaikanlagen, Hybridautos oder Smartphones benötigt man heute eine Fülle mineralischer Rohstoffe. Dazu gehören Erze, aus denen Metalle wie Kupfer, Nickel, Indium oder Gold gewonnen werden, sowie Industriemineralien wie Flussspat, Grafit oder Glimmer, die nicht zu den Metallen zählen. Glimmer wird unter anderem als Isolator in winzigen Bauteilen für die Mikroelektronik verwendet, Grafit benötigt man für Elektroden. Aus Flussspat wiederum gewinnt man Flußsäure, mit der beispielsweise Stahl oder Fotovoltaikkomponenten geätzt werden. Zu den mineralischen Rohstoffen zählen darüber hinaus Sand, Kies und Steine für die Bauindustrie.

Die mineralischen Rohstoffe werden heute fast ausschließlich in Minen an Land gewonnen. Je nach Lagerstätte baut man sie in Bergwerken unter Tage oder im Tagebau unter freiem Himmel mit großen Baggern und

Radladern ab. Eine Ausnahme sind Sand und Kies, die bereits seit geraumer Zeit nicht nur an Land abgebaut, sondern auch aus flachen Meeresgebieten gewonnen werden. Seit mehreren Jahrzehnten ist bekannt, dass es auch am Meeresboden große Vorkommen mit vielen Millionen Tonnen wertvollen Metallen gibt. Sie werden bislang aber nicht genutzt, weil die Produktion an Land die Nachfrage decken kann. Zudem ist der Abbau im Meer bis heute zu teuer und unwirtschaftlich, da die Erze mit hohem Aufwand per Schiff und Unterwasserroboter geerntet werden müssten. Hinzu kommt, dass die Fördertechnik, anders als beim etablierten Abbau an Land, erst noch entwickelt werden muss.

Angst vor Lieferengpässen

Experten gehen davon aus, dass die Landlagerstätten auch langfristig in den meisten Fällen den Bedarf an Metallen und Mineralien decken können, obgleich die Nachfrage stetig steigt. Für einige Rohstoffe aber sehen sie Engpässe voraus. So könnten durch den wachsenden Bedarf in den BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China) unter anderem jene Rohstoffe knapp werden, die nur in kleinen Mengen vorhanden sind oder gewonnen werden – beispielsweise Antimon, Germanium und Rhenium. Zum Vergleich: Im Jahr 2012 wurden weltweit rund 20 Millionen Tonnen Kupferraffinade, aber nur 128 Tonnen Germanium gewonnen.

Germanium wird heute für die Funktechnik in Smartphones, in der Halbleitertechnik oder in sogenannten Dünnschichtsolarzellen benötigt. Vor allem in den führenden Industrieländern fürchtet man, dass in den nächsten Jahrzehnten die Versorgung mit solchen für die Industrie bedeutsamen Rohstoffen unsicherer werden könnte. Dabei hängt die Versorgung unter anderem von den folgenden Faktoren ab:

Metalle der Seltenen Erden

Die Metalle der Seltenen Erden sind eine Gruppe von 17 Metallen, die im Periodensystem der chemischen Elemente nebeneinanderstehen und ähnliche Eigenschaften haben. Der ungewöhnliche Name rührt daher, dass diese Metalle früher aus Mineralien („Erden“) gewonnen wurden, die als sehr selten galten. Tatsächlich aber kommen viele der Seltenerdmetalle in der Erdkruste durchaus häufig vor. Größere Lagerstätten mit hohen Gehalten wiederum gibt es kaum. Die größten Vorkommen befinden sich in China in der Inneren Mongolei. Seltenerdmetalle werden in vielen Schlüsseltechnologien eingesetzt. So werden sie unter anderem für Dauermagnete in Magnetresonanztomographen (MRT) und in den Generatoren von Windanlagen sowie für die Herstellung von Akkus, LEDs oder Plasmabildschirmen benötigt.



2.1 > Erze für die Metallerzeugung fördert man in großen Tagebauen wie der Dexing-Kupfermine nahe der ostchinesischen Stadt Shangrao. Dabei fressen sich die Bagger tief in den Erdboden.

- steigende Nachfrage durch Neuentwicklungen: Manche Innovationsforscher erwarten, dass in den kommenden Jahren der Bedarf an bestimmten Metallen aufgrund neuer technischer Entwicklungen deutlich zunehmen wird. Ein Beispiel sind sogenannte Seltenerdmetalle, die künftig in stark steigenden Mengen beispielsweise für den Bau von Motoren für Elektroautos oder Generatoren in Windrädern benötigt werden könnten;
 - steigende Nachfrage und Konkurrenz durch das Wirtschaftswachstum in den BRIC-Staaten und Schwellenländern sowie starkes Wachstum der Erdbevölkerung;
 - begrenzte Verfügbarkeit: Viele Rohstoffe werden als Nebenprodukt bei der Förderung anderer Metalle gewonnen. So sind Germanium und das für die Herstellung von LCD-Displays essenzielle Indium Nebenprodukte der Blei- und Zinkgewinnung. Sie treten in den Blei- und Zinklagerstätten nur in geringen Mengen auf. Um mehr Germanium und Indium zu gewinnen, müsste man folglich die Blei- und Zinkproduktion erheblich erhöhen. Das wäre allerdings unwirtschaftlich, weil es keine entsprechend große Nachfrage für Blei und Zink gibt;
 - Monopolstellung von Staaten: Viele für die Industrie wichtige Rohstoffe kommen nur in wenigen Ländern vor oder werden zurzeit nur in wenigen Ländern produziert. Diese Nationen haben quasi eine Monopolstellung. Auf China zum Beispiel entfallen 97 Prozent der weltweiten Produktion von Seltenerdmetallen. Auch für andere Rohstoffe ist der ostasiatische Staat heute der wichtigste Produzent. Die Importnationen fürchten, dass China und auch andere Staaten die Verfügbarkeit der Rohstoffe durch hohe Zölle oder andere wirtschaftspolitische Maßnahmen einschränken könnten. Diese Situation wird dadurch verschärft, dass für moderne Hochtechnologien Rohstoffe von besonders hoher Qualität oder Reinheit nötig sind. Auch diese kommen in vielen Fällen weltweit nur in wenigen Regionen vor;
 - Oligopole durch Firmenkonzentration: In einigen Fällen werden Rohstoffe nur von wenigen Unternehmen abgebaut. Da in den vergangenen Jahren große Rohstoffunternehmen kleinere aufgekauft haben, hat sich die Wettbewerbssituation bei manchen Rohstoffen noch verschärft;
 - politische Situation: Problematisch ist auch die Versorgung aus politisch fragilen Staaten wie etwa der Demokratischen Republik Kongo, die durch den jahrelangen Bürgerkrieg destabilisiert ist. Das Land erbringt 40 Prozent der weltweiten Kobaltproduktion.
- Ob ein Rohstoff für ein Land oder ein Unternehmen verfügbar ist, hängt also nicht allein von der Größe der Lagerstätten weltweit ab, sondern von vielen Faktoren, die

2.2 > Viele Metalle werden heute in wenigen Ländern gewonnen, allen voran in China. Die Daten stammen aus einer umfangreichen Rohstoffanalyse aus dem Jahr 2010 und haben sich seitdem nicht wesentlich verändert. Für Gallium und Tellur fehlen zuverlässige Zahlen.

Die führenden Metallproduzenten und ihre Anteile an der Weltproduktion				
Elemente	Größter Produzent	Zweitgrößter Produzent	Drittgrößter Produzent	Verwendung
Aluminium (Al)	Australien 31 %	China 18 %	Brasilien 14 %	Fahrzeugkarosserien, Konsumgüter
Antimon (Sb)	China 84 %	Südafrika 2,6 %	Bolivien 2,2 %	Flammschutzmittel, elektronische Bauteile, Konsumgüter
Arsen (As)	China 47 %	Chile 21 %	Marokko 13 %	Halbleiter, Solarzellen, optische Bauteile
Blei (Pb)	China 43 %	Australien 13 %	USA 10 %	Strahlenabschirmungen, Batterien, Metallverarbeitung
Cadmium (Cd)	China 23 %	Korea 12 %	Kasachstan 11 %	Akkus, Pigmente, Solarzellen
Chrom (Cr)	Südafrika 42 %	Indien 17 %	Kasachstan 16 %	rostfreie und wärmefeste Stähle
Eisen (Fe)	China 39 %	Brasilien 17 %	Australien 16 %	Stahl, Industriemagnete
Gallium (Ga)	China	Deutschland	Kasachstan	LEDs, Solarzellen
Germanium (Ge)	China 71 %	Russland 4 %	USA 3 %	Smartphones, Solarzellen
Gold (Au)	China 13 %	Australien 9 %	USA 9 %	Wertanlage, Schmuck, Elektroindustrie
Indium (In)	China 50 %	Korea 14 %	Japan 10 %	Displays, Legierungen, Fotovoltaik
Kobalt (Co)	Demokratische Republik Kongo 40 %	Australien 10 %	China 10 %	verschleiß- und wärmefeste Stähle
Kupfer (Cu)	Chile 34 %	Peru 8 %	USA 8 %	Stromkabel, Elektromotoren, Baugewerbe
Lithium (Li)	Chile 41 %	Australien 24 %	China 13 %	Akkus, Luft- und Raumfahrt-technik
Mangan (Mn)	China 25 %	Australien 17 %	Südafrika 14 %	rostfreie Stähle, LEDs
Molybdän (Mo)	China 39 %	USA 25 %	Chile 16 %	Stahl
Nickel (Ni)	Russland 19 %	Indonesien 13 %	Kanada 13 %	Korrosionsschutz, korrosionsfeste Stähle
Niob (Nb)	Brasilien 92 %	Kanada 7 %	–	rostfreie Stähle, Schmuck
Palladium (Pd)	Russland 41 %	Südafrika 41 %	USA 6 %	Katalysator (chem. Industrie), Schmuck
Platin (Pt)	Südafrika 79 %	Russland 11 %	Simbabwe 3 %	Autokatalysatoren, Schmuck, Metallbeschichtungen
Selen (Se)	Japan 50 %	Belgien 13 %	Kanada 10 %	Halbleiter- und Stahlherstellung, Düngemittel
Seltenerdmetalle	China 97 %	Indien 2 %	Brasilien 1 %	Dauermagnete, Akkus, LEDs
Silber (Ag)	Peru 18 %	China 14 %	Mexiko 12 %	Wertanlage, Schmuck, chem. Industrie (Katalysator)
Tellur (Te)	Chile	USA	Peru	rostfreie Stähle, Halbleiter, Fotodioden
Vanadium (V)	China 37 %	Südafrika 35 %	Russland 26 %	Stahllegierungen, Hüllstoff für Kernbrennstäbe
Zink (Zn)	China 25 %	Peru 13 %	Australien 12 %	Korrosionsschutz, Batterien, Baugewerbe
Zinn (Sn)	China 37 %	Indonesien 33 %	Peru 12 %	Bronzebestandteil, LEDs, Displays

zusammen den Preis bestimmen. Natürlich wird der Preis nicht zuletzt auch durch die Situation auf den Rohstoffmärkten beeinflusst. So steigt der Preis eines Rohstoffs bei wachsender Nachfrage. In anderen Fällen verteuern sich Rohstoffe allein aufgrund von Spekulationen, unter anderem, weil die Märkte überreagieren. Ein Beispiel dafür war der enorme Preisanstieg bei Kupfer und anderen Rohstoffen nach 2006, als China große Rohstoffmengen aufkaufte. Von einer Knappheit konnte damals aber keine Rede sein.

Die Unsicherheit messen

Rohstoffexperten versuchen einzuschätzen, wie sicher die Versorgung mit Rohstoffen in Zukunft sein wird. Berücksichtigt werden dabei zum einen die Monopolstellung von Staaten und Unternehmen und zum anderen die politische Situation in den Abbauregionen, das sogenannte gewichtete Länderrisiko (GLR).

Das GLR wird anhand von 6 Kriterien (Indikatoren) ermittelt, mit denen die Regierungsführung einzelner Staaten sowie die politische Situation im Land bewertet werden. Diese Indikatoren wurden von der Weltbank definiert:

- Mitspracherecht und Verantwortlichkeit: Dieser Indikator besagt, inwieweit die Bürger eines Landes die Möglichkeit haben, die Regierung zu wählen. Berücksichtigt werden auch Aspekte wie Meinungs-, Presse- und Versammlungsfreiheit;
- politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt: Analysiert wird, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass eine Regierung durch Gewalt, Putsch oder Terrorismus destabilisiert werden kann;
- Wirksamkeit des Regierungshandelns: Dieses Kriterium bewertet die Qualität der öffentlichen Dienste und Behörden und misst auch, wie stark diese politischem Druck ausgesetzt sind;
- Qualität der Gesetzgebung: Nach diesem Indikator wird die Fähigkeit der Regierung eingeschätzt, Gesetze und Vorschriften zu erlassen, die eine freie Entwicklung des privaten Sektors ermöglichen;
- Rechtsstaatlichkeit: In diesem Fall wird untersucht, wie groß das Vertrauen in bestehende gesellschaft-

Wie viel Metall steckt im Erz?

Metalle werden in der Regel aus Erzen gewonnen. Oftmals liegen sie nicht als reines Metall darin vor, sondern in Form von Verbindungen, die neben dem gesuchten Metall noch eine Reihe anderer chemischer Elemente enthalten. Ein Beispiel ist das Kupfer. Es ist im Kupfererz nicht in seiner reinen Form enthalten, sondern beispielsweise als Kupfer-Schwefel-Eisen-Verbindung (Chalkopyrit) oder als Kupfer-Schwefel-Verbindung (Chalkosin). Aus solchen Mineralien muss das Metall zunächst durch mehrstufige metallurgische Verfahren herausgelöst werden. Diese Verfahren sind oft so aufwendig, dass sie bis zu 30 Prozent des Metallpreises ausmachen. Das gewonnene Metall wird als Raffinade bezeichnet. Erze sind also eine Mischung verschiedener Substanzen und haben stets nur einen gewissen Metallgehalt. Kupfererze enthalten heute meist zwischen 0,6 und 1 Prozent Kupfer. Pro Tonne Erz kann man also maximal zwischen 6 und 10 Kilogramm Kupfer gewinnen. Beim Platin ist die Ausbeute noch deutlich geringer: 1 Tonne Erz enthält in der Regel zwischen 3 und 6 Gramm Platin. Dennoch lohnt sich der Abbau, weil das Metall zu einem hohen Preis verkauft wird. Im Jahr 2013 lag der Preis pro Gramm bei rund 35 Euro.

liche Regeln ist und ob diese eingehalten werden. Bewertet wird auch, ob Verträge und Eigentumsrechte gewahrt werden. Ferner gibt dieser Indikator die Qualität der Gerichte und der Polizei an. Zudem berücksichtigt er, wie wahrscheinlich Verbrechen und Gewalt sind;

- Korruptionskontrolle: Dieser Indikator zeigt an, inwieweit Behörden und die Regierung durch privaten Profit beeinflusst werden. Dazu gehören die Korruption auf verschiedenen Ebenen sowie der Einfluss von Eliten und privaten Interessen.

Die 6 Indikatoren werden mit Zahlenwerten belegt und aufaddiert. In der Summe ergeben sich Länderrisikowerte zwischen +1,5 und -1,5. Bei Werten über 0,5 ist das Risiko gering. Zwischen -0,5 und +0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor. GLR-Werte unter -0,5 gelten als kritisch.

Inwieweit die Rohstoffversorgung durch eine Monopolstellung von Ländern und Unternehmen beeinflusst wird, versuchen Wirtschaftswissenschaftler mithilfe des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) zu bewerten, einer Kennzahl zur Konzentrationsmessung. Dieser mathematisch ermittelte Index betrachtet die Anzahl der Marktteil-

bestimmte Rohstoffe treten meist in charakteristischen geologischen Formationen auf, deren weltweite Verteilung heute weitgehend bekannt ist.

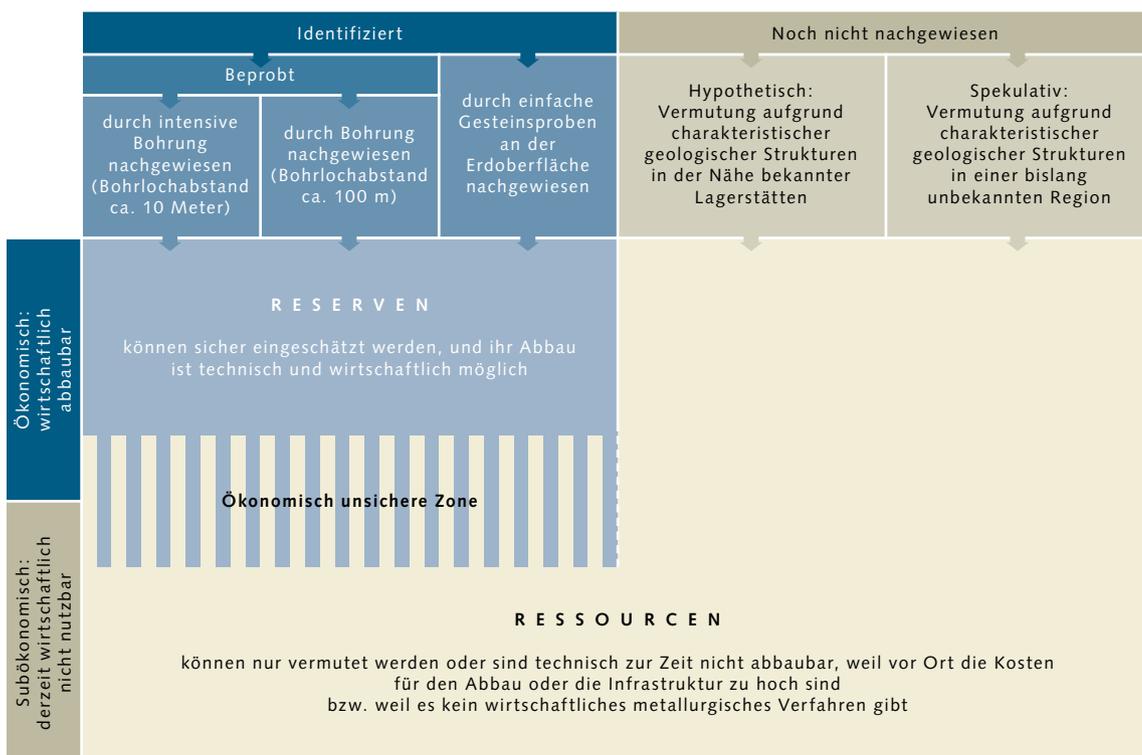
Platin etwa kommt vor allem in der südafrikanischen Bushveld-Region in einer geschichteten magmatischen Intrusion vor. Dabei handelt es sich um eine durch magmatische Aktivität entstandene Gesteinsschicht, die benachbarte Gesteinsschichten durchbrochen hat. Auch in anderen Regionen der Welt findet man Platin in geschichteten magmatischen Intrusionen. Allerdings ist der Gehalt an Platin in den Erzen oft so gering, dass sich der Abbau nicht lohnt.

Um herauszufinden, ob Metalle in einer geologischen Formation in ausreichend hoher Konzentration auftreten, sodass von einer Lagerstätte die Rede sein kann, muss man Bodenuntersuchungen, geologische und geophysikalische Analysen und Probebohrungen durchführen.

Für viele Gebiete der Erde gibt es solche Untersuchungen aber noch nicht, denn die Erkundung neuer Lagerstätten in unbekanntem Terrain ist ausgesprochen teuer und aufwendig. Bislang konzentriert man sich daher

auf die Gegenden in der Nähe schon bekannter Vorkommen. Große Teile Australiens, Kanadas, Südamerikas und Westafrikas sind aus diesem Grund bis heute kaum exploriert. Die Abschätzung der weltweiten Vorkommen ist deshalb sehr unsicher. Je nachdem wie gut ein Areal bereits beprobt oder erschlossen wurde, unterscheidet man verschiedene Typen von Vorkommen:

- **RESERVEN:** Reserven sind Rohstoffvorkommen, die bereits durch Beprobungen nachgewiesen wurden und mit heutiger Technik wirtschaftlich abgebaut werden können.
- **RESSOURCEN:** Als Ressource wird ein Vorkommen bezeichnet, wenn die Metallgehalte und die Größe noch nicht durch geeignete Beprobungen ermittelt wurden oder wenn die Rohstoffe nicht wirtschaftlich abgebaut beziehungsweise verarbeitet werden können. Ein Beispiel sind Nickellateriterze, eine spezielle Form von Nickelerz, bei der Nickel in tropischen und subtropischen Verwitterungsböden angereichert ist.



2.4 > Je nachdem wie gut die Vorkommen mineralischer Rohstoffe bekannt oder beprobt sind, werden sie in verschiedene Kategorien eingeteilt. Eine Rolle spielt auch, ob die Rohstoffe wirtschaftlich gewonnen werden können.

2.5 > Bauxit gewinnt man überwiegend im Tagebau. 800 Tonnen trägt eine solche Spezialmaschine pro Stunde ab. Verwendet wird Bauxit vor allem für die Herstellung von Aluminium.



Bis in die 1950er Jahre gab es kein wirtschaftliches Industrieverfahren, um das Nickel aus dem Erz herauszulösen. Zwar waren die Vorkommen bekannt, sie ließen sich jedoch nicht nutzen. Die Laterite wurden deshalb zu den Ressourcen gezählt. Mit der Entwicklung eines geeigneten metallurgischen Verfahrens wurden die Laterite später zu einer nutzbaren Reserve. Heute stammen rund 50 Prozent des weltweit produzierten Nickels aus solchen lateritischen Lagerstätten.

Anders als bei Erdgas und Erdöl werden die Reserven und Ressourcen bei Metallen nach dem Grad ihrer Beprobung noch weiter unterteilt. Berücksichtigt wird außerdem, inwieweit der Abbau wirtschaftlich ist.

Angesichts der großen Landgebiete weltweit, die noch nicht näher beprobt sind, gehen Geowissenschaftler davon aus, dass es noch viele unentdeckte Lagerstätten gibt und diese somit theoretisch den wachsenden Bedarf an mineralischen Rohstoffen auch in Zukunft decken können. Fraglich ist nur, ob man an Land tatsächlich neue große Bergwerke oder Tagebaue öffnen wird, denn der

Eingriff in die Landschaft ist massiv. In den vergangenen Jahrzehnten wurden durch den Berg- und Tagebau viele Landstriche völlig verändert. Menschen verloren ihre Heimat, wichtige Ökosysteme wurden zerstört. Durch den Kupferbergbau in Südamerika sind riesige Krater entstanden. In Brasilien wurden durch den Tagebau von Bauxit, einem weiteren Verwitterungsboden, aus dem Aluminium gewonnen wird, große Regenwaldgebiete vernichtet. Ein Ausbau der Förderung an Land wird deshalb sehr kritisch gesehen.

Wiederverwerten statt wegwerfen?

Eine Alternative zum verstärkten Erzabbau könnte künftig das Recycling wertvoller Rohstoffe sein. So wie Aluminium oder Stahl heute bereits in großem Stil wieder eingeschmolzen und neu verarbeitet werden, könnten in Zukunft auch viele andere Rohstoffe aus Abfällen und Elektroschrott wiedergewonnen werden. Elektroschrott wird aber heute weltweit erst von einigen wenigen Firmen aufbereitet, die insbesondere Kupfer, Silber, Gold und Platin wiedergewinnen. Verfahrenstechnisch mach-

bar wäre darüber hinaus beispielsweise ein Recycling von Indiumzinnoxid-Folie aus Bildschirmen von Smartphones. Bislang gibt es aber keine fertig konzipierte Industrieanlage für den Alltagsbetrieb.

Für das Recycling sind nicht nur ausgediente Smartphones oder Computer von Interesse. Abfälle fallen auch während der Produktion an. In der Elektronikindustrie kann heute nur ein Teil dieser Produktionsabfälle dem Fertigungsprozess wieder zugeführt werden, da Verfahren fehlen, um den Abfall aufzubereiten und die Substanzen zu extrahieren. Wünschenswert wäre beispielsweise ein Verfahren für Gallium, das insbesondere in LEDs eingesetzt wird.

Noch aber fehlt es an Sammelsystemen, über die entsprechende Altprodukte oder Produktionsabfälle dem Recycling zugeführt werden könnten. Erschwert wird das Recycling auch dadurch, dass bestimmte Metalle nur in winzigen Mengen in einem Produkt verarbeitet sind. Dadurch lohnt sich das Wiederaufarbeiten kaum. Experten bemühen sich daher um neue Verfahren, mit denen die verschiedenen verarbeiteten Stoffe besser erkannt und voneinander getrennt werden können.

Eine besondere Herausforderung sind Mikrochips und andere mikroelektronische Bauteile, in denen verschiedene Substanzen quasi miteinander verschmolzen sind. Da solche Elektroschrottabfälle bis heute meist nicht wiederverwertet werden können, werden sie von vielen Industrieländern als Abfall in Entwicklungs- und Schwellenländern exportiert. In manchen Fällen wird der Schrott auch heute noch illegal ins Ausland geliefert. Entsprechende Firmen geben an, den Schrott wiederzuverwerten und werden dafür entlohnt. Statt den Abfall technisch aufwendig zu recyceln, wird er dann aber zu geringeren Kosten exportiert.

Folgende Maßnahmen und Vorschläge für ein künftiges Recycling von Metallen werden von Fachleuten daher diskutiert:

- Neuentwicklung von Systemen zur Wiederverwertung von industriellem Produktionsabfall;
- Einführung von Wertstofftonnen für Privathaushalte;
- vorrangige Entwicklung von Recyclingverfahren für Metalle mit einem hohen Versorgungsrisiko (Länderisiko, Länderkonzentration);

- Schaffen von wirtschaftlichen Anreizen für die Entwicklung eines funktionierenden Recyclingmarkts, der sich auf Rohstoffe aus Konsumgütern, Altautos oder Elektroschrott spezialisiert.

Meeresbergbau als Alternative?

Um die Versorgung mit Rohstoffen künftig sicherer zu gestalten, gibt es für viele Staaten und Unternehmen aber noch eine andere Alternative, die nicht nur aus rein wirtschaftlichen, sondern auch aus geopolitischen Erwägungen eine Rolle spielen kann: den Meeresbergbau. Zum einen vermeidet man damit Landnutzungskonflikte, die Berg- und Tagebaue mit sich bringen; zum anderen hoffen Staaten, die nicht über eigene Rohstoffreserven verfügen, sich über den Meeresbergbau ein Stück weit von den Exportnationen unabhängig zu machen.

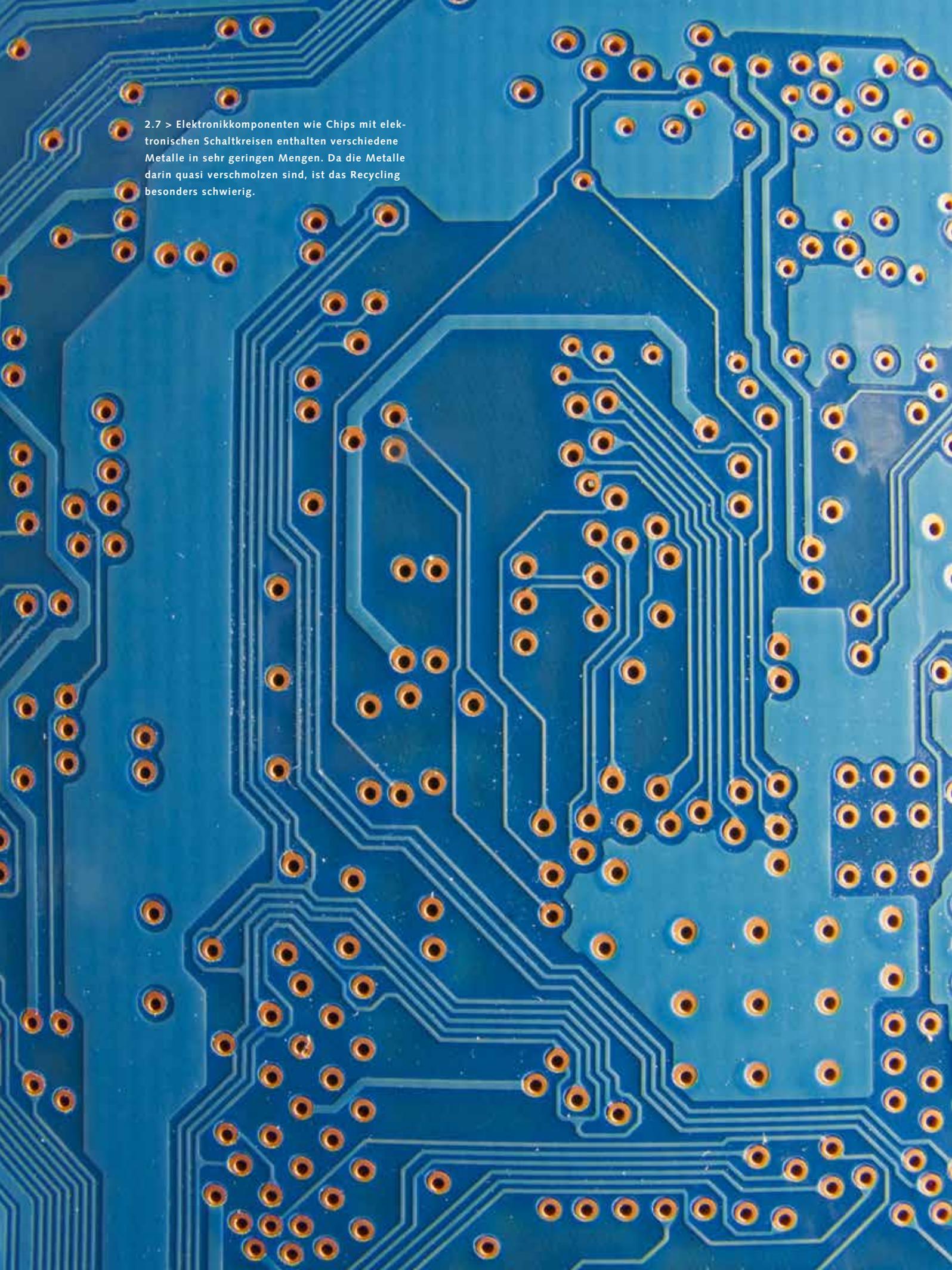
Grundsätzlich muss man beim Meeresbergbau 2 Situationen unterscheiden: den Bergbau in den Hoheitsgewässern eines Staates und den Bergbau im Bereich der Hohen See, die als Erbe der Menschheit und gemeinsame Ressource aller Staaten gilt.

Den Bergbau in den Hoheitsgebieten regeln die Nationalstaaten in eigener Verantwortung. Im Bereich der Hohen See hingegen werden Lizenzgebiete von einer Behörde zentral vergeben, der Internationalen Meeresbo-

2.6 > Eine Arbeiterin in einer Recyclingfabrik in San José, Costa Rica, sortiert Weißblechdoesen, aus denen Aluminium wiedergewonnen wird.



2.7 > Elektronikkomponenten wie Chips mit elektronischen Schaltkreisen enthalten verschiedene Metalle in sehr geringen Mengen. Da die Metalle darin quasi verschmolzen sind, ist das Recycling besonders schwierig.



denbehörde (International Seabed Authority, ISA) mit Sitz in Kingston, Jamaika. Die ISA wacht insbesondere darüber, dass die Gewinne aus den Aktivitäten des Meeresbergbaus künftig gerecht verteilt werden. So soll verhindert werden, dass allein reiche Staaten Zugriff auf die vielversprechenden Ressourcen haben. In den vergangenen Jahren hat die ISA bereits zahlreiche Lizenzgebiete zur Erkundung an mehrere Staaten vergeben, die dort zurzeit nur explorieren dürfen. Abgebaut wird noch nirgends, weil die endgültigen Abbauregeln momentan noch diskutiert werden. Die ISA will bis 2016 die gesetzlichen Rahmenbedingungen für einen solchen marinen Bergbau aufstellen.

Für den Meeresbergbau sind vor allem 3 Typen von Rohstoffvorkommen interessant, die unterschiedliche Wertmetalle enthalten:

- **MANGANKNOLLEN:** Manganknollen sind kartoffel- bis salatkopfgroße Mineralanreicherungen, die riesige Bereiche der Tiefseeebenen im Pazifik sowie im Indischen Ozean bedecken. Sie enthalten vor allem die chemischen Elemente Mangan, Eisen, Kupfer, Nickel und Kobalt sowie andere Substanzen wie Molybdän, Zink und Lithium. Manganknollen finden sich meist in Wassertiefen unterhalb von 3500 Metern.
- **KOBALTKRUSTEN:** Kobaltkrusten sind Überzüge von Mineralien, die sich an den Flanken submariner Gebirgszüge und Seeberge bilden. Sie entstehen durch die Ablagerung von im Wasser gelösten Mineralien und enthalten vor allem Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel sowie Platin und Seltenerdelemente. Kobaltkrusten gibt es insbesondere im Westpazifik in Tiefen von 1000 bis 3000 Metern.
- **MASSIVSULFIDE:** Massivsulfide lagern sich vor allem an den Austrittsstellen heißer Quellen am Meeresboden ab. In diesen Gebieten dringt kaltes Meerwasser zuerst durch Spalten bis zu mehrere Kilometer tief in den Meeresboden ein. An Magmakammern in der Tiefe heizt sich das Meerwasser dann auf Temperaturen von mehr als 400 Grad Celsius auf. Dabei löst es metallhaltige Mineralien aus dem Gestein. Durch die Erwärmung steigt das mineralisierte Wasser sehr

schnell auf und schießt zurück ins Meer. Sobald es sich mit dem kalten Meerwasser vermischt, bilden die Mineralien einen Niederschlag, der sich an der Quelle in Form von massiven Erzvorkommen ablagert. Massivsulfide finden sich an vielen Stellen am Meeresboden, die vulkanisch aktiv sind oder waren. Je nach Region enthalten die Massivsulfide unterschiedliche Anteile an Kupfer, Zink, Blei, Gold und Silber sowie an zahlreichen wichtigen Spurenmetallen wie Indium, Germanium, Tellur oder Selen.

Wann und ob Meeresrohstoffe abgebaut werden, hängt vor allem davon ab, wie sich die Rohstoffpreise weltweit entwickeln. Dass die Weltmarktpreise wie der Erdölpreis kontinuierlich steigen werden, ist keinesfalls sicher. Neue Bergbauprojekte an Land könnten beispielsweise dazu führen, dass Preise für bestimmte Rohstoffe wieder fallen. So hat sich in der Vergangenheit bereits mehrfach gezeigt, dass mit dem Beginn der Förderung in einer neuen großen Landlagerstätte meist ein Rohstoffüberangebot entsteht. Kosteneinsparungen tragen ebenfalls zu fallenden Preisen bei. Solche Einsparungen lassen sich unter anderem durch neue Abbautechnologien, durch Automatisierung oder durch verbesserte verfahrenstechnische Prozesse in der metallurgischen Verarbeitung erreichen.

Andererseits steigen die Preise, wenn die Nachfrage nach einem Rohstoff zunimmt. Das könnte künftig bei den Rohstoffen der Fall sein, die aufgrund technischer und gesellschaftlicher Entwicklungen sehr gefragt sind. Ein Beispiel ist das Metall Neodym, das zunehmend für den Bau von Elektromotoren und Windradgeneratoren benötigt wird. Experten fürchten für die kommenden Jahre, dass sich das Angebot an Neodym verknappen könnte. Sollten die Preise für Metalle, die auch in marinen Rohstoffen vorkommen, in den nächsten Jahren aufgrund derartiger Mangelsituationen steigen, könnte der Meeresbergbau tatsächlich wirtschaftlich werden. Ob dieser Fall eintritt, kann heute aber noch niemand sagen.

Eine Ausnahme sind möglicherweise die Massivsulfide im Hoheitsgebiet von Papua-Neuguinea, die viel Gold und Silber enthalten. Bereits seit mehreren Jahren ist dort ein Abbau vorgesehen. Aus wirtschaftlichen und vertragsrechtlichen Gründen wurde der Förderbeginn aber schon mehrfach verschoben.

Sand, Kies und Phosphat aus dem Meer

Der Abbau von mineralischen Rohstoffen im Ozean ist nicht neu. So fördern viele Staaten schon seit Jahrzehnten Sand und Kies aus dem Meer. Dieses Lockergestein wird für die Betonherstellung, als Füllsand auf Baustellen und in Häfen sowie im Küstenschutz für Strandvorspülungen benötigt.

Wie viel Sand und Kies weltweit aus dem Meer entnommen werden, lässt sich nur schwer schätzen, weil die Daten nicht zentral erfasst sind. Als größter Markt für Sand und Kies aus dem Meer gilt Europa. Vor allem Sand ist gefragt. Nach Schätzung des Internationalen Rats für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea, ICES), der für den Meereslebensraum Nordatlantik zuständig ist, wurden in Europa im Jahr 2012 93,5 Millionen Kubikmeter Sand aus dem Meer entnommen, was in etwa dem Rauminhalt von 37 Cheops-Pyramiden entspricht. Den größten Anteil hatten die Niederlande mit rund 63 Millionen Kubikmetern. Allein 37 Millionen Kubikmeter wurden für Vorspülungen an der Nordseeküste und insbesondere auf den niederländischen Inseln benötigt. Damit werden in jedem Jahr Sandmassen ausgeglichen, die durch die Herbst- und Winterstürme an der Nordsee fortgespült werden. Ein Teil der jährlich verbrauchten Sandmenge wird für die Erweiterung des Seehafens Rotterdam genutzt. Der niederländische Verbrauch ist erstaunlich hoch, wenn man bedenkt, dass in den USA in jedem Jahr nur rund 57 Millionen Kubikmeter Sand aus dem Meer gewonnen werden. Hier wird dieser Sand fast ausschließlich für Küsten- und Strandvorspülungen verwendet.

Der zweitgrößte europäische Verbraucher von Sand aus dem Meer ist Großbritannien, das im Jahr 2011 fast 12 Millionen Kubikmeter Sand verbrauchte. Hinzu kommen knapp 7 Millionen Kubikmeter Kies. Sowohl Sand als auch Kies werden in Großbritannien zu 80 Prozent für die Betonherstellung genutzt, insbesondere in der Hauptstadt London und in Südengland.

Andere Staaten bauen Sand und Kies nicht in diesem Maße regelmäßig ab. Allerdings werden in einzelnen Fällen große Mengen für Bauvorhaben benötigt. Beispiele sind der Ausbau des Flughafens in Hongkong oder des Seehafens in Singapur. Auch für den Bau künstlicher Inseln wie etwa The Palm vor Dubai wird Sand aus dem Meer benötigt, obwohl viel Wüstensand vorhanden ist. Das liegt daran, dass Sandkörner aus dem Meer rund gewaschen sind und sich damit besser für die Betonherstellung eignen als die eckigen Körner des Wüstensands. Meeressand und Meereskies kommen also vor allem dann zum Einsatz, wenn es an Land keine geeigneten Vorkommen gibt. Das ist auch in Südengland und in den Niederlanden der Fall. Allerdings ist der Abbau von Sand und Kies im Meer in der Regel teurer als der an Land, weshalb weltweit betrachtet meist terrestrische Lagerstätten bevorzugt werden.

Sand und Kies werden mit Spezialschiffen gewonnen, die das Material mit einem großen Rohr vom Meeresboden saugen. Dieses Verfahren wird

als Saugbaggern bezeichnet. Die Röhren haben eine Länge von bis zu 85 Metern und einen Durchmesser von bis zu 1 Meter. Die Baggergebiete sind in der Regel 3 Kilometer lang und einige Hundert Meter breit. Sand wird dabei mit 2 verschiedenen Verfahren abgebaut: erstens dem statischen Saugbaggern, bei dem das Schiff vor Anker liegt und den Sand an einer einzigen Stelle absaugt. Dabei entstehen Kuhlen von bis zu 10 Meter Tiefe. Beim zweiten Verfahren zieht das Schiff ein Rohr mit einem Schleppkopf hinter sich her und fährt in langsamer Fahrt eine Route durch das Baggergebiet ab. Dabei wird vom Meeresboden eine Sandschicht mit einer Dicke von 25 bis 50 Zentimetern abgesaugt.

Seit Langem wird diskutiert, inwieweit der großräumige Sand- und Kiesabbau die Lebensgemeinschaften im Meer stört oder vernichtet. Die Fischereiindustrie in der Nordsee beispielsweise fürchtete, dass der Fischfang durch das Saugbaggern beeinträchtigt wird. Kritisiert wurde unter anderem, dass:

- Fische durch den Lärm der Saugbagger vertrieben werden;
- die Jagdgebiete und Laichplätze der Fische durch das Baggern oder durch aufgewirbelten Sand zerstört werden;
- Fischgeschirre wie etwa Hummerkörbe durch die Saugbagger ruiniert werden.

Seit Anfang dieses Jahrtausends hat man daher eine Reihe biologischer Studien durchgeführt, mit denen insbesondere die Auswirkungen auf die Meeresumwelt eingeschätzt wurden. Diese Forschungen zeigten, dass das Saugbaggern die Meeresgebiete tatsächlich beeinträchtigt, die Auswirkungen aber relativ kleinräumig sind. Eine englische Untersuchung etwa belegte, dass Gebiete, die 25 Jahre lang für den Sandabbau genutzt wurden, etwa 6 Jahre brauchen, um vollständig wiederbesiedelt zu werden. Wird in einem Areal nur kurzfristig oder gar einmalig gebaggert, stellen sich die ursprünglichen Verhältnisse nach 1 bis 2 Jahren wieder ein. Eine niederländische Studie kommt sogar zu dem Schluss, dass sich 2 Jahre nach dem Abbaggern für eine Aufspülung und Hafenerweiterung vor Rotterdam die Fischbiomasse im Baggergebiet sogar deutlich erhöhte. Woran das liegt, ist unklar.

Erwiesen ist andererseits auch, dass durch den Abbau die Zusammensetzung des Sediments verändert wird. Werden Kies oder grobkörniger Sand abgebaut, füllen sich die Flächen häufig mit feinerem Sand, der durch die Strömung herantreibt. In feinkörnigen Arealen wiederum leben andere Meeresbewohner als in grobkörnigen. Diese Veränderungen können Jahre anhalten. Allerdings wird in verhältnismäßig kleinen Gebieten von wenigen Quadratkilometern gebaggert. Von einer großen Veränderung des Lebensraums kann also nicht die Rede sein.

Der Konflikt zwischen der Fischerei und der Sand- und Kiesindustrie wurde in Großbritannien dadurch entschärft, dass die Lizenzen für die



2.8 > Vor der niederländischen Insel Ameland fördert ein Saugbagger Sand vom Grund der Nordsee, mit dem der Inselstrand verbreitert werden soll.

Meeresgebiete heute nach dem Meeres- und Küstennutzungsgesetz (Marine and Coastal Access Act) vergeben werden, das 2010 in Kraft trat. Das Gesetz koordiniert und regelt erstmals die Raumplanung in den Gewässern Großbritanniens und die gemeinsame Nutzung durch Fischerei, den Tourismus, Windenergieunternehmen oder eben die Sand- und Kiesbranche. Bei der Vergabe der Gebiete soll unter anderem sichergestellt werden, dass diese weit genug von den Laichgebieten der Fische entfernt sind. Damit soll vermieden werden, dass der durch das Baggern aufgewirbelte Sand die Eier von Heringen und anderen Arten bedeckt und erstickt.

In manchen Ländern wird der Abbau von Sand und Kies sehr kritisch gesehen. In Südafrika etwa wird Dünen sand an der Küste für die Bauindustrie gewonnen. Kritiker fürchten, dass die Küsten dadurch weniger gut geschützt sind, weil Dünen ein natürliches Bollwerk gegen die Meerbrandung sind.

In Indien protestieren Fischer gegen den Sandabbau an Stränden. Sie fürchten, dass durch die aufgewirbelten Schwebstoffe die Fische beeinträchtigt werden und die Fangmenge schrumpft.

In Marokko wird Sand seit mehr als 10 Jahren illegal an den Stränden abgebaut, um ihn für die Betonherstellung in andere Länder zu verkaufen. Dadurch sind Strände an einigen Stellen bereits in Mondlandschaften verwandelt worden. Die Tourismusindustrie fürchtet Imageverluste und finanzielle Einbußen.



2.9 > Beim sogenannten Regenbogenverfahren wird das Sand-Wasser-Gemisch vom Schiff aus auf den Strand gepumpt.

Neben Sand und Kies könnte künftig noch eine andere mineralische Ressource in großem Stil aus dem Meer gewonnen werden: Phosphat. Phosphat wird insbesondere als Pflanzendünger in der Landwirtschaft benötigt. Es wird in enormen Ausmaß in Landlagerstätten beispielsweise in Westafrika oder Tunesien abgebaut und von dort in viele Staaten exportiert. Für weit entfernte Länder ist der Import und der lange Transport per Schiff relativ teuer, sodass diese Staaten auf Ressourcen im Meer vor der eigenen Küste zurückgreifen möchten. In Neuseeland soll Phosphat künftig auf dem Meeresrücken Chatham Rise vor der Ostküste abgebaut werden. Naturschützer laufen dagegen Sturm, weil sie fürchten, dass wichtige Lebensräume am Meeresboden zerstört werden. Die Befürworter argumentieren, dass die Abbaufäche im Vergleich zu dem Gebiet, das durch die Schleppnetzerei beeinträchtigt wird, verschwindend klein sei.

Auch in Namibia und Südafrika hat eine Debatte um die Ernte von Phosphat im Meer begonnen. In Namibia machen sich Fischer Sorgen, dass durch den Meeresbergbau westlich von Walvis Bay Fanggründe des Seehechts zerstört werden. In Südafrika wiederum kritisieren Umweltschützer, dass die geplanten Abbaugelände vor der Küste mit besonders schutzwürdigen, artenreichen und empfindlichen Ökosystemen in Berührung kommen, Vulnerable Marine Ecosystems (VME) genannt. Sie fordern, dass zunächst ausführliche Umweltverträglichkeitsstudien durchgeführt werden, ehe der Abbau beginnt.

Begehrte Manganknollen

> Metallhaltige Knollen bedecken viele Tausend Quadratkilometer des Tiefseebodens. Sie enthalten vor allem Mangan, aber auch Nickel, Kobalt und Kupfer, was sie wirtschaftlich interessant macht. Obwohl heute bereits mehrere Staaten und Industriefirmen die Vorkommen intensiv erkunden, ist offen, ob die Manganknollen tatsächlich abgebaut werden. Denn auch mittelfristig gibt es an Land genug Metall.

Klumpen voller Metall

Manganknollen gelten heute zusammen mit den Kobaltkrusten als die wichtigsten Lagerstätten von Metallen und anderen mineralischen Rohstoffen im Meer. Die kartoffel- bis salatkopfgroßen Knollen enthalten, wie der Name sagt, vor allem Mangan, aber auch Eisen, Nickel, Kupfer, Titan und Kobalt. Die Manganknollenvorkommen sind unter anderem deshalb interessant, weil sie von einigen Metallen größere Mengen enthalten als die heute bekannten und wirtschaftlich abbaubaren Landlagerstätten. So geht man davon aus, dass sich in den Manganknollenvorkommen weltweit beispielsweise deutlich mehr Mangan befindet als in den Reserven auf dem Festland.

Wirtschaftlich interessante Vorkommen findet man vor allem im Pazifik und im Indischen Ozean in den weiten Tiefseeebenen in Meerestiefen von 3500 bis 6500 Metern. Die einzelnen Knollen liegen lose auf dem Meeresboden, sind aber teilweise auch von einer dünnen Sedimentschicht bedeckt. Theoretisch lassen sie sich relativ leicht vom Meeresboden ernten. Man kann sie mit Unterwassergefährten wie mit einer Kartoffelerntemaschine vom Meeresboden auflesen. Dass das funktioniert, wurde bereits Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre mit Prototypen gezeigt.

4 große Vorkommen

Manganknollen gibt es in vielen Meeresgebieten. In nennenswerter Menge kommen sie in den folgenden 4 Meeresregionen vor:

CLARION-CLIPPERTON-ZONE (CCZ): Diese Zone ist das weltweit größte Manganknollengebiet mit einer Fläche von rund 9 Millionen Quadratkilometern, was in etwa der Größe Europas entspricht. Die CCZ liegt im Pazifik und

erstreckt sich von der Westküste Mexikos bis nach Hawaii. Die Manganknollen sind nicht gleichmäßig über dieses Gebiet verteilt. An manchen Stellen liegen sie dicht an dicht. In steinigten Arealen kommen gar keine Knollen vor. Durchschnittlich findet man in der CCZ pro Quadratmeter etwa 15 Kilogramm Manganknollen. Besonders ergiebige Gebiete bringen es auf 75 Kilogramm. Insgesamt rechnet man hier mit einer Manganknollenmasse von rund 21 Milliarden Tonnen.

PERU-BECKEN: Etwa 3000 Kilometer vor der peruanischen Küste liegt das Peru-Becken. Es ist etwa halb so groß wie die Clarion-Clipperton-Zone. Hier findet man pro Quadratmeter durchschnittlich 10 Kilogramm Manganknollen.

PENRHYN-BECKEN: Das dritte bedeutende Manganknollengebiet im Pazifik befindet sich im Penrhyn-Becken in unmittelbarer Nähe der Cookinseln, mehrere Tausend Kilometer östlich von Australien. Es hat eine Fläche von ungefähr 750 000 Quadratkilometern. Große Bereiche in den Küstengewässern der Cookinseln weisen Gehalte von über 25 Kilogramm Manganknollen pro Quadratmeter Meeresboden auf.

INDISCHER OZEAN: Hier hat man bislang nur ein einziges größeres Manganknollengebiet entdeckt, das in etwa so groß wie das Areal im Penrhyn-Becken ist. Es liegt im zentralen Indischen Ozean. Auf 1 Quadratmeter Meeresboden liegen hier rund 5 Kilogramm Manganknollen.

Vom Wachsen der Knolle

Das Entstehungsprinzip der Manganknollen ist denkbar einfach. Im Meerwasser gelöste Metallverbindungen lagern sich nach und nach an einer Art Keim am Meeres-

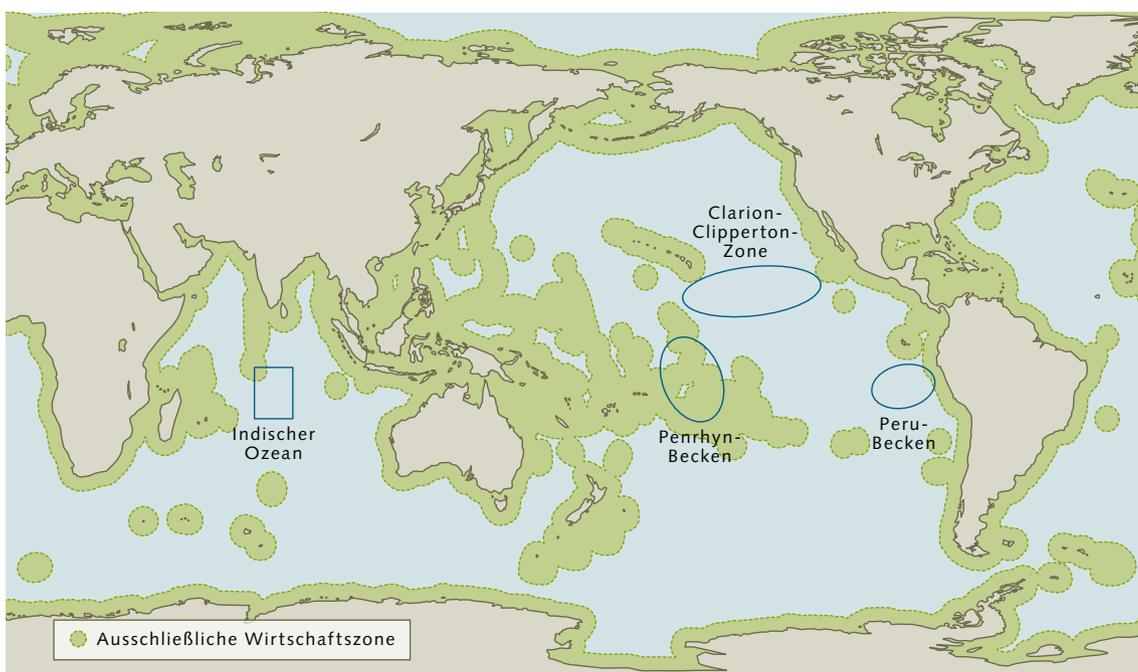


2.10 > Schnitt durch eine Manganknolle: In Jahrmillionen lagern sich Mineralien an einem Keim an.

Metallgehalte der Manganknollenvorkommen in Millionen Tonnen

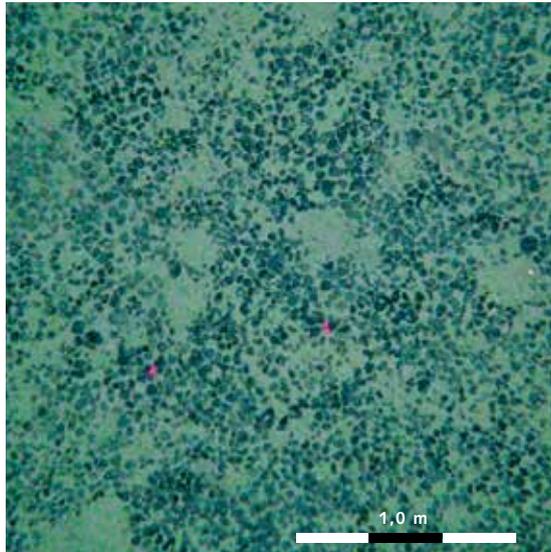
Elemente	Clarion-Clipperton-Zone (CCZ)	Globale Reserven und Ressourcen an Land (sowohl wirtschaftlich abbaubare als auch subökonomische Vorräte)	Globale Reserven an Land (heute wirtschaftlich abbaubare Vorräte)
Mangan (Mn)	5992	5200	630
Kupfer (Cu)	226	1000+	690
Titan (Ti)	67	899	414
Seltenerdoxide	15	150	110
Nickel (Ni)	274	150	80
Vanadium (V)	9,4	38	14
Molybdän (Mo)	12	19	10
Lithium (Li)	2,8	14	13
Kobalt (Co)	44	13	7,5
Wolfram (W)	1,3	6,3	3,1
Niob (Nb)	0,46	3	3
Arsen (As)	1,4	1,6	1
Thorium (Th)	0,32	1,2	1,2
Bismut (Bi)	0,18	0,7	0,3
Yttrium (Y)	2	0,5	0,5
Platinmetalle	0,003	0,08	0,07
Tellur (Te)	0,08	0,05	0,02
Thallium (Tl)	4,2	0,0007	0,0004

2.11 > Die Manganknollenvorkommen weltweit bergen große Mengen an Metallen. Allein das Vorkommen in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) enthält circa 10-mal mehr Mangan als die heute wirtschaftlich abbaubaren Lagerstätten an Land. Beim Thallium ist die Menge in der CCZ sogar 6000-mal größer als in den wirtschaftlich nutzbaren Landlagerstätten. Grundsätzlich ist zu bedenken, dass hier mögliche Vorkommen auf See mit tatsächlich wirtschaftlich gewinnbaren Vorkommen an Land verglichen werden. Ob und wie viel Metall künftig aus Manganknollen gewonnen werden kann, ist völlig offen.



2.12 > Manganknollen kommen in allen Meeren vor. Doch nur in 4 Gebieten ist die Manganknollendichte groß genug für einen industriellen Abbau.

2.13 > In verschiedenen Regionen der Tiefsee kommen Manganknollen in unterschiedlichen Mengen vor. In diesem Ausschnitt vom pazifischen Meeresboden liegen die Knollen relativ dicht beieinander.



boden ab. Ein solcher Keim kann beispielsweise ein Haifischzahn oder auch ein Muschelsplitter sein, um den herum die Knolle wächst. Dieser Wachstumsprozess kann auf 2 Arten ablaufen. Bei der sogenannten hydrogenetischen Entstehung lagern sich Metallverbindungen an, die im Wasser herabsinken. Zum größten Teil handelt es sich dabei um die Mangan-Sauerstoff-Verbindung Vernaldit, die sich auf natürliche Weise im Wasser bildet. Hinzu kommen in geringeren Mengen Verbindungen anderer Metalle.

Im zweiten Fall spricht man vom diagenetischen Wachstum. Dieser Prozess läuft nicht im freien Wasser, sondern im Sediment ab. In diesem Fall lagern sich am Keim Metallverbindungen ab, die im Wasser zwischen den Sedimentpartikeln enthalten sind, im sogenannten Porenwasser. Bei diesem handelt es sich um Meerwasser, das in den Meeresboden eindringt, mit dem Sediment reagiert und sich auf diese Weise mit Metallverbindungen anreichern kann. Wo es aus dem Sediment aufsteigt, lagern sich die Metallverbindungen ebenfalls an den Knollenkeimen ab. In der Regel handelt es sich dabei um die Mangan-Sauerstoff-Verbindungen Todorokit und Birnessit.

Die meisten Knollen wachsen sowohl hydrogenetisch als auch diagenetisch, wobei sich die jeweiligen Anteile in verschiedenen Meeresgebieten unterscheiden. Faszinierend ist, dass Manganknollen extrem langsam wachsen. Mit jeder Million Jahre nimmt ihre Dicke nur millimeter-

weise zu. Hydrogenetische Knollen wachsen pro Million Jahre bis zu 10 Millimeter, diagenetische zwischen 10 und 100 Millimeter. Daraus folgt, dass sich Manganknollen nur dort bilden konnten, wo über derart lange Zeiträume gleiche Umweltbedingungen herrschten. Folgende Faktoren sind für die Entstehung von Manganknollen entscheidend:

- geringe Sedimentation von Schwebstoffen. Andernfalls würden die Knollen zu schnell überdeckt werden;
- steter Fluss von antarktischen Tiefenwasser. Das Wasser treibt sehr feine Sedimentpartikel fort, die die Knollen sonst im Laufe der Zeit unter sich begraben würden. Übrig bleiben gröbere Partikel wie etwa die Gehäuse von Meeresorganismen, Muschelsplitter oder Knollenbruchstücke, die als Wachstumskeime dienen können;
- gute Sauerstoffversorgung. Das antarktische Tiefenwasser beispielsweise fördert sauerstoffreiches Wasser von der Meeresoberfläche in die Tiefe. Erst dadurch können sich Mangan-Sauerstoff-Verbindungen bilden;
- wässriges Sediment. Das Sediment muss so beschaffen sein, dass es viel Porenwasser aufnehmen kann. Nur in solch wässrigem Sediment ist diagenetisches Knollenwachstum möglich.

Einige Forscher vertreten darüber hinaus die Ansicht, dass Bodenlebewesen wie etwa Würmer in großer Zahl vorhanden sein müssen, die das Sediment durchgraben und die Manganknollen immer wieder an die Sedimentoberfläche befördern. Diese Hypothese wurde bislang aber noch nicht bewiesen.

Andere Gegend, andere Rezeptur

Obwohl die Faktoren für die Entstehung der Manganknollen in allen 4 großen Gebieten gleich sind, unterscheiden sie sich von Ort zu Ort deutlich in ihren Metallgehalten. Die höchsten Mangangehalte finden sich mit 34 Prozent in den Knollen des Peru-Beckens, die höchsten Eisengehalte mit 16,1 Prozent in den Knollen im Penrhyn-Becken. Hier gibt es auch, mit gut 0,4 Prozent, die Knollen mit dem

höchsten Gehalt an Kobalt. Daher hat auch in diesem Gebiet derzeit die Gewinnung von Kobalt Priorität. Nach Berechnungen von Fachleuten ließen sich hier 21 Millionen Tonnen Kobalt aus Manganknollen gewinnen, was sehr viel ist. So belaufen sich die wirtschaftlich nutzbaren Reserven an Land derzeit auf rund 7,5 Millionen Tonnen. Nimmt man die heute noch nicht wirtschaftlich abbaubaren Landlagerstätten hinzu, ließen sich an Land 13 Millionen Tonnen Kobalt gewinnen – noch immer deutlich weniger als die Knollen im Penrhyn-Becken liefern könnten. Allerdings ist der Kobaltpreis nach einem Rekordhoch vor der Wirtschaftskrise seit 2008 stark gefallen, sodass sich ein Abbau der Vorkommen im Moment nicht lohnen würde.

Dennoch ist es angesichts der großen Metallmengen, die weltweit in den Manganknollen zu finden sind, durchaus vorstellbar, dass die Knollen künftig in bestimmten Meeresregionen abgebaut werden. Für viele Staaten, die nicht über eigene Reserven an bestimmten Metallen verfügen, sind die Manganknollen ein Weg, sich von Importen unabhängig zu machen.

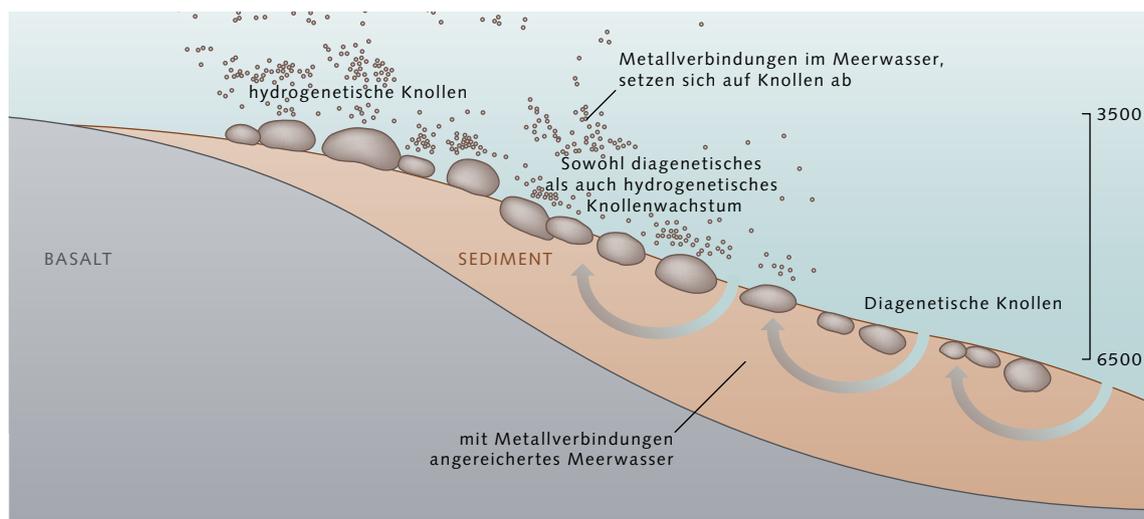
Wem gehören die Rohstoffe im Meer?

Das Internationale Seerecht regelt sehr genau, wer künftig Manganknollen oder auch Massivsulfide und Kobaltkrusten abbauen darf. Befinden sich die Rohstoffe innerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszone eines Landes, der

200-Seemeilen-Zone, hat dieses Land das alleinige Recht, die Rohstoffe abzubauen – das ist beispielsweise in einem Teil des Penrhyn-Beckens nahe der Cookinseln der Fall – oder Abbaulizenzen an ausländische Unternehmen zu vergeben.

Die CCZ, das Peru-Becken und das Gebiet im Indischen Ozean hingegen liegen weit außerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen, nämlich im Bereich der Hohen See. Hier wird der Abbau durch eine Behörde der Vereinten Nationen zentral geregelt, die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) mit Sitz in Kingston, Jamaika. Die ISA wacht insbesondere darüber, dass die Gewinne aus den Aktivitäten des Meeresbergbaus künftig gerecht verteilt werden. Ihre Handlungsgrundlagen sind verschiedene Artikel im Internationalen Seerecht, nach denen die Hohe See als gemeinsames Erbe der Menschheit definiert ist. Aktivitäten in der Hohen See sollen demnach dem Wohl der ganzen Menschheit dienen. Verhindert werden soll unter anderem, dass nur reiche Staaten Zugriff auf die vielversprechenden Ressourcen in der Tiefsee haben.

Für die Manganknollengebiete bedeutet dies, dass die Lizenznehmer bei der ISA Erkundungsgebiete mit einer Größe von bis zu 150 000 Quadratkilometern beantragen. Für diese Gebiete müssen die einzelnen Vertragspartner Lizenzgebühren zahlen. Entscheidend ist, dass die Staaten nur die Hälfte ihres Lizenzgebietes nutzen dürfen – also maximal 75 000 Quadratkilometer. Die andere Hälfte



2.14 > Manganknollen wachsen, indem sich im Wasser gelöste Metallverbindungen aus dem freien Wasser (hydrogenetisches Wachstum) oder dem im Sediment enthaltenen Wasser (diagenetisches Wachstum) an einem Keim ablagern. Meist wachsen Knollen sowohl dia- als auch hydrogenetisch.

2.15 > Wie chemische Analysen von Manganknollen zeigen, unterscheiden sich Manganknollen der verschiedenen Meeresgebiete deutlich in ihren Metallgehalten.

Chemische Bestandteile von Manganknollen aus unterschiedlichen Meeresgebieten				
Elemente	Manganknollen der CCZ	Manganknollen des Peru-Beckens	Manganknollen aus dem Indischen Ozean	Manganknollen aus dem Gebiet der Cookinseln
Mangan (Mn) **	28,4	34,2	24,4	16,1
Eisen (Fe) **	6,16	6,12	7,14	16,1
Kupfer (Cu) *	10 714	5988	10 406	2268
Nickel (Ni) *	13 002	13 008	11 010	3827
Kobalt (Co) *	2098	475	1111	4124
Titan (Ti) **	0,32	0,16	0,42	1,15
Tellur (Te) *	3,6	1,7	40	23
Thallium (Tl) *	199	129	347	138
Seltenerdelemente + Yttrium *	813	403	1039	1707
Zirkonium (Zr) *	307	325	752	588

* Gramm pro Tonne ** Gewichtsanteil in Prozent

bleibt nach der Vorerkundung für ärmere Staaten reserviert. Bislang hat die ISA 12 Lizenzen für die CCZ und 1 Lizenz für den Indischen Ozean vergeben, jeweils an Länder. Die Lizenznehmer sind im Einzelnen: China, Deutschland, Frankreich, Indien, Japan, Russland, Südkorea sowie die Interoceanmetal Joint Organization, ein Zusammenschluss von Bulgarien, Tschechien, Slowakei, Polen, Russland und Kuba.

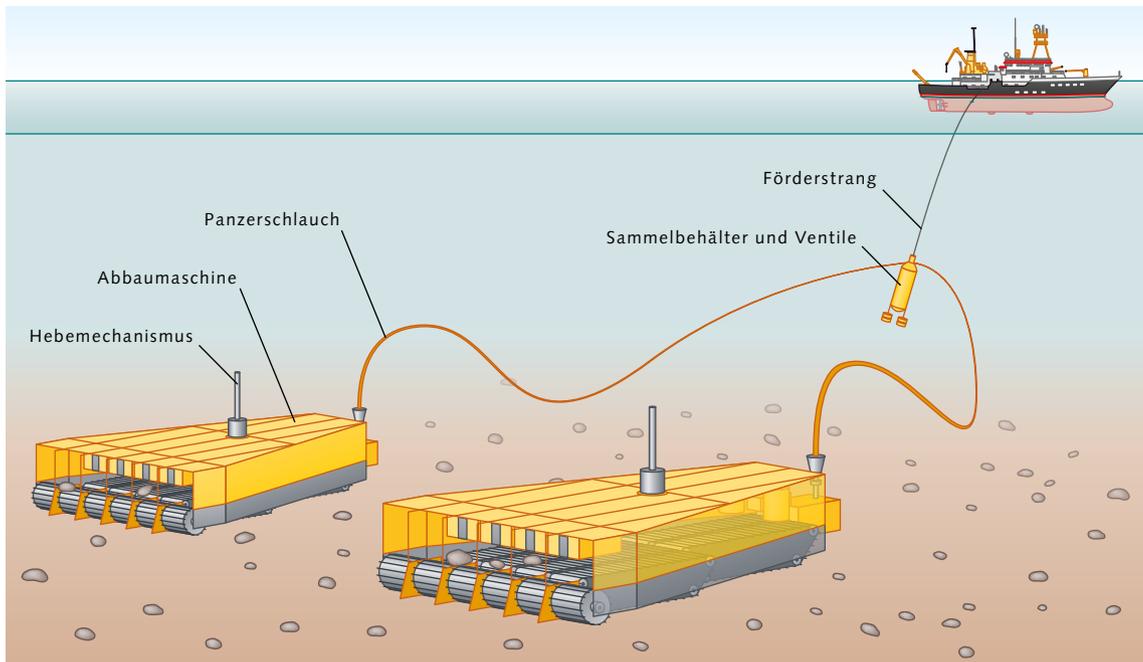
Vor Kurzem sind 2 Industrieunternehmen als Antragsteller hinzugekommen: die britische Firma UK Seabed Resources Limited und die belgische G-TEC Sea Mineral Resources NV. Seit 2011 haben auch einige Entwicklungsländer (Nauru, Kiribati und Tonga), die mit westlichen Firmen kooperieren, Anträge gestellt. Diese Anträge beziehen sich auf die von den ursprünglichen Lizenznehmern erkundeten Gebiete, die für die Entwicklungsländer reserviert waren und jetzt an Nauru, Kiribati und Tonga übergeben werden. Die finanziellen und technischen Mittel für die weitere Erkundung und spätere Erschließung dieser Gebiete werden allerdings nicht von den 3 Inselstaaten, sondern von den Industriepartnern erbracht.

Bislang handelt es sich bei den von der ISA vergebenen Lizenzen nur um eine Explorationslizenz, die es den Staaten erlaubt, die künftigen Abbaugelände genauer

zu untersuchen. Unter anderem wird derzeit im Detail untersucht, in welchen Teilen der Gebiete die höchsten Knollendichten oder Knollen mit besonders hohen Metallgehalten zu finden sind. Diese Lizenzen wurden für 15 Jahre vergeben und können einmalig um 5 Jahre verlängert werden. Danach muss der Abbau beginnen, sonst verliert der Staat sein Abbaurecht. Gesetzliche Rahmenbedingungen für den künftigen Bergbau wird die ISA allerdings erst 2016 festgelegt haben, denn noch sind einige Punkte offen. Ungeklärt ist bislang, mit welcher Technik die Knollen künftig geerntet werden sollen und wie sich die Meeresumwelt vor dem großflächigen Abbau weitgehend schützen lässt.

Noch fehlen Abbaugeräte

Ein Manganknollenabbau im industriellen Maßstab ist derzeit auch deshalb nicht möglich, weil es noch keine marktreifen Abbaumaschinen gibt. Japan und Südkorea haben in den vergangenen Jahren zwar bereits Prototypen gebaut und im Meer getestet, doch müssen diese noch weiter verbessert werden. Die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hatte vor 3 Jahren eine Designstudie für den Entwurf entsprechender



2.16 > Manganknollen sollen künftig mit Erntemaschinen vom Meeresboden aufgelesen und über feste Schläuche zum Schiff gepumpt werden. Bislang wurden aber noch keine Maschinen gebaut. Konzeptstudien sehen vor, die Apparate mit speziellen Gehäusen zu versehen, die verhindern sollen, dass viel Sediment aufgewirbelt wird.

Tiefseemaschinen ausgeschrieben, die Deutschland künftig im eigenen Lizenzgebiet in der CCZ einsetzen will. Daran beteiligte sich unter anderem eine Firma, die bereits Maschinen für den Diamantenabbau im Atlantik vor Namibia herstellt. Allerdings werden die Geräte bei der Diamantengewinnung in 150 Meter Tiefe nahe der Küste eingesetzt. Für Tiefen wie in der CCZ und die Einsatzbedingungen auf der Hohen See müssen sie noch angepasst werden. Immerhin müssen die Maschinen für den Manganknollenabbau dem hohen Wasserdruck in bis zu 6000 Meter Tiefe standhalten können. Außerdem sollen sie lange zuverlässig arbeiten, denn die Reparatur von Tiefseegeräten ist ausgesprochen aufwendig, weil die bis zu 250 Tonnen schweren Maschinen dafür zunächst an Bord geholt werden müssten.

Derzeit geht man davon aus, dass künftig allein im deutschen Lizenzgebiet in der Clarion-Clipperton-Zone jährlich rund 2,2 Millionen Tonnen Manganknollen gefördert werden müssen, damit der Abbau wirtschaftlich ist. Dafür benötigt man aber nicht nur Abbaumaschinen, sondern auch Technik für die folgenden Arbeitsschritte. Die Förderung beginnt mit den Abbaumaschinen, die den Meeresboden bis in eine Tiefe von 5 Zentimetern durchpflügen und die Knollen aus dem Sediment klaben. Der

größte Teil der Sedimente soll bereits vor Ort abgetrennt werden und am Meeresboden verbleiben. Das restliche Knollen-Sediment-Gemisch wird dann vom Meeresboden über feste Schläuche zu Produktionsschiffen an die Wasseroberfläche gepumpt. Auf den Schiffen werden die Manganknollen vom restlichen Sediment getrennt und gereinigt. Anschließend verlädt man sie auf Frachter, die sie zum Festland transportieren, wo sie aufbereitet und die Metalle abgetrennt werden. Diese gesamte Prozesskette muss noch entwickelt werden. Zudem fehlt es heute noch zum Teil an metallurgischen Verfahren, um die verschiedenen Metalle aus den Manganknollen zu gewinnen.

Zerstörung der Tiefseelebensräume?

Wissenschaftler sind sich darin einig, dass der Abbau von Manganknollen einen erheblichen Eingriff in den Lebensraum Meer darstellt. Derzeit geht man von folgenden Beeinträchtigungen aus:

- Die Erntemaschinen wirbeln beim Durchpflügen des Meeresbodens Sediment auf. Diese Sedimentwolke kann aufgrund der Meeresströmung durch die Gegend driften. Rieselt das Sediment schließlich wieder zum

Belebte Manganknollenfelder

Sollten in Zukunft Manganknollen abgebaut werden, wäre das ein erheblicher Eingriff in den Lebensraum Tiefsee, weil die Erntemaschinen weite Flächen des Meeresbodens umpflügen würden. Wie stark und in welcher Art und Weise die Ökosysteme in der Tiefsee dadurch betroffen sein werden, lässt sich im Detail aber nur schwer einschätzen, da man bisher nur kleine Bereiche wissenschaftlich untersucht hat. Die wenigen Studien, die bislang vorliegen, zeigen aber eindeutig, dass es in der Tiefe mehr Leben gibt, als man es lange vermutet hatte.

Viele der Organismen wie etwa Würmer leben im Tiefseesediment vergraben – insbesondere in den oberen 15 Zentimetern des Meeresbodens. Der Eindruck einer öden Wüste täuscht also. Und auch im freien Wasser existieren etliche Organismen, darunter Fische und Schnecken. Die Tiefseelebewesen werden nach ihrer Größe in verschiedene Kategorien eingeteilt. Für die Unterscheidung bei kleinen Arten ist insbesondere die Maschenweite der Siebe, mit denen man die Tiere aus Boden- oder Wasserproben herausfiltert, ein Kriterium. Man unterscheidet im Allgemeinen die 4 folgenden Kategorien:

DIE MIKROFAUNA: Sie besteht aus Organismen, die kleiner als die Maschenweite sehr feiner Siebe von 0,03 Millimetern sind. Sie setzt sich fast ausschließlich aus Mikroorganismen zusammen.

DIE MEIOFAUNA: Zu ihr zählen beispielsweise Ruderfußkrebse, Nematoden (kleine Würmer) sowie die Foraminiferen, eine bestimmte Gruppe von Einzellern, die in Kalkgehäusen leben. Diese Organismen werden von Sieben mit einer Maschenweite von 0,03 bis 0,06 Millimetern zurückgehalten.

DIE MAKROFAUNA: Sie umfasst Tiere, die von Sieben mit einer Maschenweite von 0,3 bis 0,5 Millimetern zurückgehalten werden. Viele Makrofaunaorganismen leben im Sediment, vor allem Borstenwürmer, aber auch Krebse und Muscheln.

DIE MEGAFUNA: Zu ihr zählen Tiere, die man mit bloßem Auge auf Unterwasservideos oder -fotos erkennen kann, beispielsweise Fische, Schwämme, Seegurken und Seesterne. Diese Organismen sind 2 bis mehr als 100 Zentimeter groß.

Eine Besonderheit in den pazifischen Manganknollengebieten sind besonders große Arten der Foraminiferen. Die Foraminiferen der Gattung *Xenophyophora* sind anders als ihre winzigen Artgenossen bis zu 10 Zentimeter groß und zählen damit zur Megafauna. Die Xenophyophoren leben auf dem Sediment und hinterlassen ähnlich wie Seegurken viele Meter lange Fraßspuren.

Weitgehend unklar ist bisher, wie groß in den Manganknollengebieten der Anteil endemischer Arten ist. Meeresbiologen verschiedener Forschungsinstitute werten derzeit Bodenproben von Expeditionen aus. Mehrere endemische Arten wurden bereits entdeckt. Darüber hinaus wird vermutet, dass sich die Artenzusammensetzung in und auf den Tiefseesedimenten alle 1000 bis 3000 Kilometer verändert – also auch schon innerhalb eines Manganknollengebiets. Der Grund dafür ist, dass die Nährstoffbedingungen in verschiedenen Meeresgebieten leicht variieren, was unter anderem von den oberflächennahen Meeresströmungen und dem Transport von Nährstoffen abhängt. Je mehr von diesen im Wasser enthalten sind, desto mehr Biomasse wird durch Algen produziert und rieselt später in die Tiefe. Je nach Kohlenstoffangebot herrschen dann unterschiedliche Organismen vor. Verglichen mit den nährstoffreichen Küstengebieten, sind die Kohlenstoffunterschiede zwischen den verschiedenen Tiefseearealen gering. Dennoch bewirken sie offenbar Unterschiede in der Artenzusammensetzung. Meeresbiologen fordern daher, den Abbau so zu regeln, dass die verschiedenen Artengemeinschaften und damit der Charakter der jeweiligen Tiefseeareale wenigstens zum Teil erhalten bleiben und eine entsprechende Wiederbesiedlung möglich ist. Diese Aspekte sowie der Schutz endemischer Arten sollen in den Abbauregelungen der ISA berücksichtigt werden.



2.17 > In der Clarion-Clipperton-Zone wurden verschiedene Tierarten wie Seegurken, Tiefseegarnelen, Fische und Schlangensterne gefunden.

Meeresboden herab, werden dadurch empfindliche Organismen, insbesondere die sessilen – festsitzenden – Arten zugedeckt und getötet.

- Im durchpflügten Bereich werden all jene Organismen getötet, die nicht schnell genug vor dem Pflug fliehen können, dazu zählen unter anderem Schnecken, Seeurken oder Würmer. Und selbst wenn sie nicht durch den Pflug geschädigt werden sollten, können sie immer noch mit aufgesaugt und beim Reinigungsprozess an Bord des Schiffes sterben.
- Der Abbau, das Heraufpumpen und Reinigen der Manganknollen erzeugt Lärm und Vibrationen, die Meeressäuger wie etwa Delfine und Wale stören und verdrängen können.
- Das bei der Reinigung der Manganknollen anfallende sedimenthaltige Abwasser wird von den Schiffen ins Meer eingeleitet. Auch dadurch entsteht an der Einlassöffnung eine Sedimentwolke. Derzeitige Konzepte jedoch sehen eine bodennahe Einleitung in der Tiefe vor, um die Ausbreitung der Wolke zu minimieren. Durch eine Einleitung in der Tiefe wird auch verhindert, dass die oberflächennahen, lichtdurchfluteten Wasserschichten getrübt werden. Biologen befürchten nämlich, dass durch eine Trübung der oberflächennahen Gewässer das Wachstum von Algen und anderen Planktonorganismen gestört werden könnte.

Sicher ist, dass sich diese Probleme nicht völlig ausschließen lassen. Diskutiert wird derzeit allerdings, wie man sie möglichst stark verringern kann. In jedem Fall fordert die ISA eine umweltschonende Manganknollenproduktion. Und tatsächlich scheint es Lösungen zu geben. Die Sedimentwolke etwa lässt sich aktuellen Studien zufolge dadurch verkleinern, dass man keine offenen, sondern verkleidete Erntemaschinen einsetzt. Dadurch wird zum Teil verhindert, dass Sediment aufgewirbelt wird und sich im Wasser verteilt. Ferner lässt sich die durch die Schiffsabwässer freigesetzte Sedimentwolke dadurch reduzieren, dass man die Abwässer über Rohre zum Meeresboden zurückleitet, sodass sich die Partikel relativ schnell absetzen können. Allerdings würde diese zusätzliche Rohrleitung die Manganknollenproduktion deutlich verteuern, sagen Ingenieure.

Unklar ist bis heute, wie schnell sich die Lebensräume am Meeresboden von diesem massiven Eingriff erholen werden. Zwar gab es seit Ende der 1980er Jahre mehrere internationale Projekte, in denen man untersucht hat, wie rasch abgeerntete Flächen am Meeresboden wiederbesiedelt werden. Doch waren diese Eingriffe eher kleinräumig. So hatten zum Beispiel Wissenschaftler in dem deutschen Projekt Disturbance and Recolonization (DISCOL, Störung und Wiederbesiedlung) einen mehrere Quadratkilometer großen Bereich des Meeresbodens im Pazifik mit Versuchsgeräten umgepflügt und über mehrere Jahre hinweg immer wieder besucht. Das Ergebnis: Es dauerte 7 Jahre, bis sich in den durchpflügten Gebieten wieder die gleiche Dichte an Bodenlebewesen eingestellt hatte wie zuvor. Allerdings blieben einige Arten, insbesondere diejenigen, die auf Hartsubstrat angewiesen waren, verschwunden. Nach 7 Jahren war der gestörte Bereich also deutlich artenärmer.

Für das Jahr 2015 wird das deutsche Bundesforschungsministerium Geld für eine Expedition bereitstellen, in deren Rahmen diese Gebiete noch einmal besucht werden sollen. Damit wird man weltweit erstmals feststellen, welche Langzeitfolgen nach 25 Jahren zu beobachten sind. Die DISCOL-Forscher betonen, dass die Schädigung bei einem großflächigen Abbau von Manganknollen noch deutlich größer sein dürfte. Immerhin hatte man im Experiment ein vergleichsweise kleines Gebiet abgeerntet. Die geschädigten Bereiche konnten aus der unberührten Umgebung also schnell wiederbesiedelt werden. Erntet man aber, wie vorgesehen, sehr viele Quadratkilometer Meeresboden ab, dürfte die Wiederbesiedlung der abgeernteten Flächen viele Jahre länger dauern.

Deshalb sieht die ISA vor, die Lizenzgebiete nicht auf einmal, sondern Stück für Stück abzuernten. Neben abgeernteten Gebieten sollen unberührte Flächen erhalten bleiben. Von dort könnten die abgeernteten Gebiete wiederbesiedelt werden. Wie das Muster aus genutzten und unbenutzten Arealen im Detail beschaffen sein muss, versuchen Meeresbiologen zu klären. So wäre es auch denkbar, Manganknollenflächen von vornherein weniger intensiv abzuernten – und in einzelnen Etappen, beispielsweise wie beim DISCOL-Projekt in einem Wechsel von abgeernteten und unberührten Streifen. Dank präziser GPS-Navigation wäre das heute durchaus möglich.

Metallreiche Krusten

> Kobaltkrusten sind eine vielversprechende Ressource am Meeresboden, da sie große Mengen an Kobalt, Nickel, Mangan und anderen Metallen enthalten, die die Gehalte in Landlagerstätten zum Teil übertreffen könnten. Sie bilden sich auf Gesteinsflächen an untermeerischen Erhebungen. Zu ihrem Abbau sind Maschinen nötig, die das Material vom Untergrund abtrennen können. Darüber liegen bislang aber nur Konzeptstudien vor.

Seeberge

Seeberge, die Seamounts, sind durch vulkanische Aktivität am Meeresboden in Millionen Jahren in die Höhe gewachsen. Seamounts kommen in allen Meeren vor und erreichen eine Höhe von 1000 bis 4000 Metern. Kleinere Seeberge mit geringerer Höhe nennt man auch Knolls.

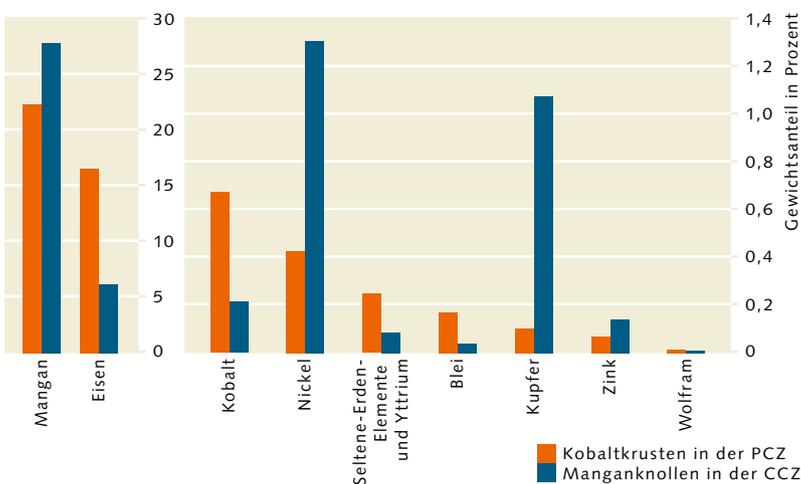
Deckschicht auf dem Fels

Kobaltkrusten sind steinharte, metallhaltige Beläge, die sich auf den Felshängen von untermeerischen Vulkanen, sogenannten Seebergen, bilden. Diese Krusten entstehen ähnlich wie Manganknollen, indem sich im Laufe von Jahrtausenden Metallverbindungen im Wasser auf dem Gestein ablagern.

Wie bei den Manganknollen läuft diese Ablagerung ausgesprochen langsam ab: Pro Million Jahre wachsen die Krusten 1 bis 5 Millimeter und damit sogar noch langsamer als die Manganknollen. Je nachdem wie stark das Meerwasser mit Metallverbindungen angereichert ist, haben sich in verschiedenen Meeresgebieten Krusten unterschiedlicher Dicke gebildet. Auf manchen Seebergen sind diese nur 2 Zentimeter mächtig, in den ergiebigen Gebieten bis zu 26 Zentimeter. Da Kobaltkrusten fest mit

dem felsigen Untergrund verbunden sind, können sie nicht einfach wie Manganknollen vom Meeresboden aufgehoben werden. Vielmehr müsste man sie künftig aufwendig vom Untergrund abtrennen.

Experten schätzen, dass es weltweit mindestens 33 000 Seeberge gibt. Die genaue Zahl kennt man nicht. Davon kommen etwa 57 Prozent im Pazifik vor. Der Pazifik ist somit die wichtigste Kobaltkrustenregion der Welt. Besonders interessant ist der Westpazifik. Hier findet man die ältesten Seeberge, die bereits im Jura vor rund 150 Millionen Jahren entstanden sind. Entsprechend viele Metallverbindungen konnten sich hier im Laufe der Zeit ablagern und vergleichsweise dicke Krusten bilden. Primäre Krustenzone (Prime Crust Zone, PCZ) wird dieses Gebiet rund 3000 Kilometer südwestlich von Japan genannt. Man schätzt die Krustenmenge in der PCZ auf insgesamt 7,5 Milliarden Tonnen.

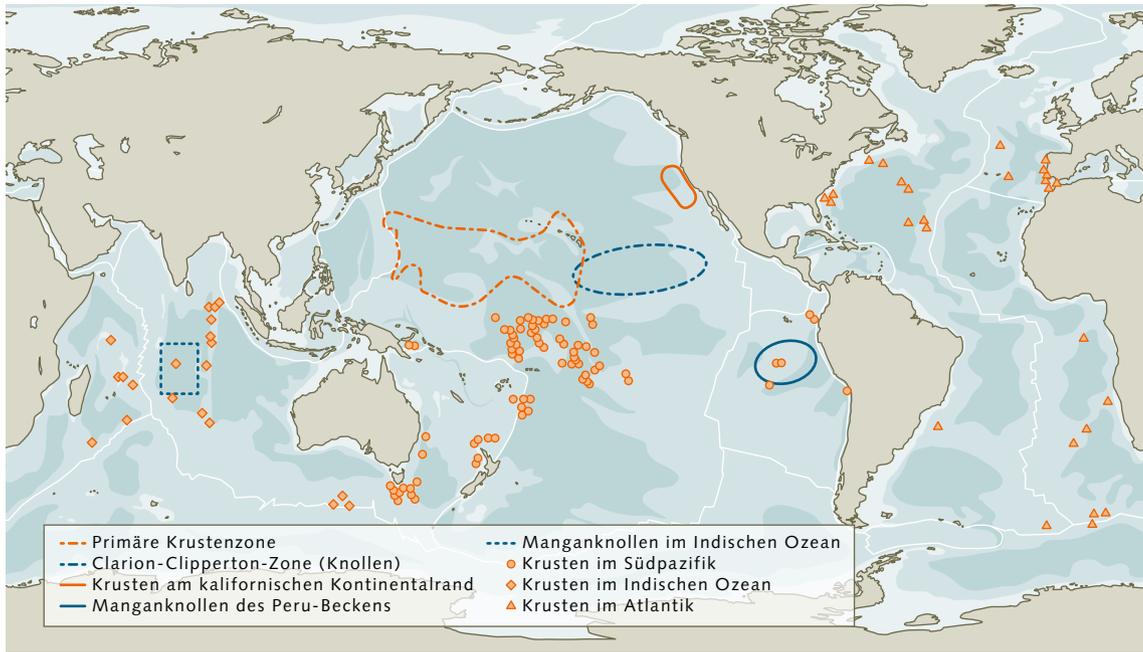


Eine Kruste, reich an Metallen

Wie die Manganknollen stellen auch die Kobaltkrusten eine sehr große Metallressource im Meer dar. Wie der Name schon sagt, enthalten die Krusten, verglichen mit Landlagerstätten und Manganknollen, relativ viel Kobalt. Den größten Anteil in den Kobaltkrusten haben aber die Metalle Mangan und Eisen. Im Englischen bezeichnet man die Krusten etwas präziser als cobalt-rich ferromanganese crusts (kobaltreiche Eisenmangankrusten). Auch Tellur kommt in Kobaltkrusten in vergleichsweise großen Mengen vor. Tellur wird insbesondere für die Produktion besonders effizienter Dünnschicht-Fotovoltaikzellen benötigt.

Die Krusten der Primären Krustenzone enthalten zwar absolut gesehen nicht ganz so viel Mangan wie die Manganknollen der Clarion-Clipperton-Zone. Dennoch sind die Manganmengen in der PCZ noch knapp 3-mal

2.18 > Manganknollen und Kobaltkrusten enthalten vor allem Mangan und Eisen. Da Eisen in Landlagerstätten in großen Mengen vorhanden ist, spielt es für den Meeresbergbau keine Rolle. Betrachtet man die übrigen Elemente, deren Gewichtsanteil geringer ist, ergeben sich aber große Unterschiede. Bei den Manganknollen überwiegen Nickel und Kupfer, bei den Kobaltkrusten Kobalt, ebenfalls Nickel und Seltenelemente.



2.19 > Kobaltkrusten und Manganknollen kommen in verschiedenen Meeresgebieten vor. Für beide Rohstoffe aber gibt es besonders ergiebige Regionen. Das bedeutendste Kobaltkrustengebiet ist die Primäre Krustenzone im Westpazifik (Prime Crust Zone, PCZ). Das wichtigste Manganknollengebiet die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ).

Metallgehalte in Millionen Tonnen

Elemente	Kobaltkrusten in der Primären Krustenzone (PCZ)	Globale Reserven an Land (heute wirtschaftlich abbaubare Vorräte)	Globale Reserven und Ressourcen an Land (wirtschaftlich abbaubare als auch subökonomische Vorräte)	Manganknollen in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ)
Mangan (Mn)	1714	630	5200	5992
Kupfer (Cu)	7,4	690	1000+	226
Titan (Ti)	88	414	899	67
Seltenerdoxide	16	110	150	15
Nickel (Ni)	32	80	150	274
Vanadium (V)	4,8	14	38	9,4
Molybdän (Mo)	3,5	10	19	12
Lithium (Li)	0,02	13	14	2,8
Kobalt (Co)	50	7,5	13	44
Wolfram (W)	0,67	3,1	6,3	1,3
Niob (Nb)	0,4	3	3	0,46
Arsen (As)	2,9	1	1,6	1,4
Thorium (Th)	0,09	1,2	1,2	0,32
Bismut (Bi)	0,32	0,3	0,7	0,18
Yttrium (Y)	1,7	0,5	0,5	2
Platinmetalle	0,004	0,07	0,08	0,003
Tellur (Te)	0,45	0,02	0,05	0,08
Thallium (Tl)	1,2	0,0004	0,0007	4,2

2.20 > Besonders ergiebige Kobaltkrusten finden sich im Westpazifik in einem Gebiet von der Größe Europas, der Primären Krustenzone (PCZ). Vergleicht man diese mit Landlagerstätten und dem Manganknollengebiet in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ), zeigt sich, dass in der PCZ vor allem die Kobalt- und Tellurvorkommen vergleichsweise groß sind und die Mengen sowohl der Landlagerstätten als auch der CCZ übertreffen.

größer als die heute wirtschaftlich abbaubaren Mengen an Land. Im südlichen Bereich der PCZ finden sich darüber hinaus Krusten mit vergleichsweise hohen Gehalten an Seltenerdelementen.

Stark umströmte Seeberge

Kobaltkrusten bilden sich auf allen freiliegenden Gesteinsoberflächen an untermeerischen Erhebungen, vor allem auf Seebergen und Knolls. Zum Teil wirken Seeberge wie gigantische Rührstäbe im Meer, die große Wirbel erzeugen. In diesen Wirbeln an den Seebergen werden oftmals Nährstoffe oder andere Substanzen gefangen, die von der Meeresoberfläche herabrieseln oder mit der Meeresströmung herangetrieben werden. Auch Metallverbindungen können darin enthalten sein, die sich dann auf dem Gestein ablagern. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Bildung von Kobaltkrusten ist, dass der Fels oder

die aufwachsenden Krusten frei von Sedimenten gehalten werden. Auch diese Bedingung ist an den Seebergen und anderen Erhebungen erfüllt: Die Strömungen tragen die feinen Sedimente fort und halten das Gestein und die Krusten frei.

Kobaltkrusten findet man in Tiefen von 600 bis 7000 Metern. Wie Untersuchungen an Seebergen ergeben haben, bilden sich die dicksten und wertstoffreichsten Krusten im oberen Bereich der Seeberghänge, die gut angeströmt werden. Im Durchschnitt liegen diese in Wassertiefen von 800 bis 2500 Metern in der Nähe der Sauerstoffminimumzone. Analysen zeigen außerdem, dass Krusten in einer Tiefe von 800 und 2200 Metern die höchsten Kobaltgehalte haben. Warum das so ist, wissen die Forscher noch nicht genau.

Ähnlich wie ein Schwamm oder Aktivkohle, die oft als Filtersubstanz im Aquarium eingesetzt wird, sind Kobaltkrusten sehr porös. Dank dieser vielen nur wenige Mikrometer kleinen Poren haben die Krusten eine große innere Oberfläche. So wie in den Poren eines Aktivkohlefilters Schadstoffe hängen bleiben, lagern sich an der großen Oberfläche der Krusten Metallverbindungen ab. Da im Meerwasser gelöste Metalle nur in extrem geringen Konzentrationen enthalten sind, dauert das Wachstum der Krusten dennoch sehr lange. Die Krusten entstehen vor allem durch die Anlagerung von Eisenhydroxidoxid [FeO(OH)] und Manganoxid (Vernadit, MnO₂) an. Alle anderen Metalle werden sozusagen als Trittbrettfahrer mit dem Eisenhydroxidoxid und dem Vernadit in und auf der Krustenoberfläche angelagert. Der Grund: Im Meer heften sich verschiedene Metallionen an die im Wasser enthaltenen Eisenhydroxidoxid- und Vernaditmoleküle an. Eisenhydroxidoxid ist leicht positiv geladen und zieht damit negativ geladene Ionen wie etwa Molybdänoxid (MoO₄²⁻) an. Vernadit hingegen ist leicht negativ geladen und zieht positiv geladene Ionen wie zum Beispiel Kobaltionen (Co²⁺), Kupferionen (Cu²⁺) oder Nickelionen (Ni²⁺) an.

Fast alle im Meerwasser enthaltenen Metallionen stammen übrigens vom Land. Sie werden dort im Laufe der Zeit aus dem Gestein gewaschen und über die Flüsse in die Ozeane transportiert. Eisen und Mangan hingegen gelangen meist über vulkanische Quellen am Meeresboden, die Hydrothermalquellen, ins Meer.

Sauerstoff aus der Tiefe lässt Krusten wachsen

Kobaltkrusten entstehen, wenn Metallionen im Wasser mit Sauerstoff zu Oxiden reagieren, die sich auf dem Fels der Seeberge ablagern. Oxide und damit auch Kobaltkrusten können sich also nur dort bilden, wo das Meerwasser ausreichend Sauerstoff enthält. Paradoxerweise aber finden sich an Seebergen die mächtigsten Kobaltkrusten in der Nähe der Tiefenzone, in der das Meerwasser am wenigsten Sauerstoff enthält. Diese sogenannte Sauerstoffminimumzone umfasst in der Regel einige Hundert Meter und liegt in den meisten Meeresgebieten in einer Tiefe von 1000 Metern. Sie entsteht, weil durch den bakteriellen Abbau von herabrieselnder, abgestorbener Biomasse der Sauerstoff im Wasser aufgezehrt wird. Da das Wasser hier nicht mehr durch Sturm und Wellen vermischt wird, dringt kaum neuer Sauerstoff in die Tiefe vor. So dürften sich theoretisch weder Oxide noch Kobaltkrusten bilden. Dieser Widerspruch lässt sich allerdings auflösen: Da in der Sauerstoffminimumzone sehr wenig Sauerstoff vorhanden ist und die Metallionen nur wenige Oxide bilden, reichern sich die Ionen im sauerstoffarmen Wasser an. An Erhebungen im Meeresboden wie etwa Seebergen aber strömt sauerstoffreiches Tiefenwasser vom Meeresboden empor. Das kann beispielsweise Meerwasser sein, das um den Südpol stark abkühlt, bis zum Meeresboden absinkt und sich in der Tiefe ausbreitet. An den Seebergen gelangt dann punktuell mit diesem antarktischen Tiefenwasser Sauerstoff in das mit Metallionen angereicherte sauerstoffarme Wasser, und es bilden sich metallreiche Oxide, die sich dann als Niederschlag auf den Gesteinsoberflächen absetzen und im Laufe der Zeit die Krusten bilden.

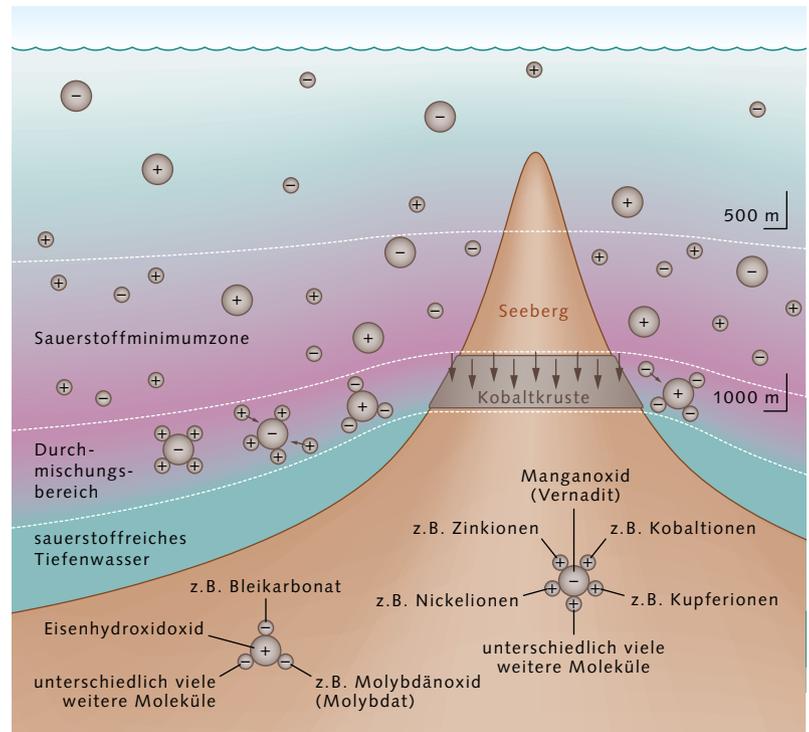
Krustenabbau in Hoheitsgebieten?

Manganknollen und Kobaltkrusten sind für den künftigen Meeresbergbau gleichermaßen interessant, da sie viele industriell wichtige Metalle in Spuren enthalten, die aufgrund der großen Tonnagen an Kobaltkrusten und Manganknollen wirtschaftlich von Interesse sind. Was die Exploration und den künftigen Abbau betrifft, gibt es aber wesentliche Unterschiede. Das betrifft beispielsweise die rechtliche Situation. Anders als bei den Manganknollen liegen die meisten ergiebigen Krustenvorkommen nicht in den internationalen Gewässern der Hohen See, sondern in den Ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) verschiedener Inselstaaten. Über einen zukünftigen Abbau wird dort also nicht die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) bestimmen, sondern die jeweiligen lokalen Regierungen. Konkrete Pläne gibt es derzeit aber in keinem Land.

Für die Krustenvorkommen in den internationalen Gewässern hingegen gibt es seit Kurzem ein verbindliches Regelwerk. So verabschiedete die ISA erst im Juli 2012 international verbindliche Regeln für die Exploration solcher Krustenvorkommen im Gebiet der Hohen See. Zwar legten inzwischen bereits China, Japan und Russland der ISA schon Arbeitspläne für eine künftige Exploration in den internationalen Gewässern des Westpazifiks vor, doch müssen der Rat und die Versammlung der Meeresbodenbehörde diese zunächst noch genehmigen. In diesen Arbeitsplänen ist aufgeführt, welche Basisinformationen die Staaten in den nächsten Jahren sammeln wollen, dazu gehören die Probennahme am Meeresboden und die Analyse der Krusten, Tiefenmessungen oder auch Untersuchungen der Fauna.

Schwierige Dickenmessung

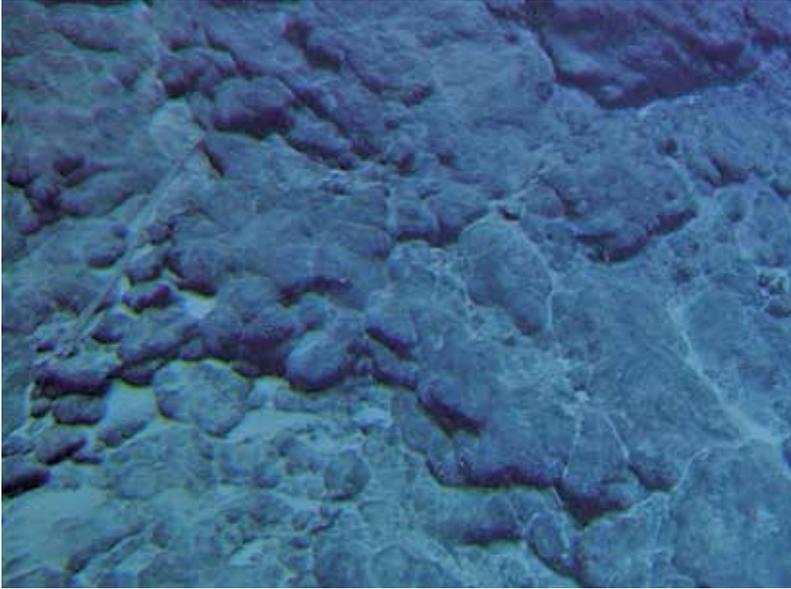
Auch in technischer Hinsicht unterscheidet sich die Exploration der Kobaltkrusten fundamental von der Situation bei den Manganknollen. Manganknollen können durch sogenannte Kastengreifer wie mit einer Baggerschaufel leicht und schnell an Bord geholt werden, um Proben zu nehmen und beispielsweise Metallgehalte zu messen. Auch sind die Knollen über größere Strecken relativ gleichmäßig über den Meeresboden verteilt. Damit lassen



2.21 > Viele Metallionen gelangen als Trittbrettfahrer in die Kobaltkrusten. Die Metallionen lagern sich im Wasser an Eisenhydroxidoxid- und Vernaditmolekülen an, die sich dann auf und in der porösen Oberfläche der Krusten absetzen.

sich die Vorkommen durch Foto- und Videoaufnahmen relativ gut einschätzen, insbesondere auch die Größe der Knollen. Die Beprobung und Messung der Dicke von Kobaltkrusten hingegen sind deutlich schwieriger, da Gesteinsbrocken abgerissen oder herausgebohrt werden müssen. Die lokalen Unterschiede sind kaum bekannt, und die punktuelle Untersuchung ist ausgesprochen aufwendig und teuer.

Sehr viel effizienter wären daher Messgeräte, die man in der Tiefe knapp über dem Meeresboden durch das Wasser zieht, die also quasi im Vorbeifliegen die Dicke der Krusten präzise messen könnten. Auf diese Weise ließen sich große Areale in kurzer Zeit untersuchen. Daher arbeiten derzeit Wissenschaftler an der Verfeinerung hochauflösender akustischer Geräte. Diese beschallen den Meeresboden mit Wellen, fangen die aus dem Boden reflektierten Signale auf und berechnen daraus den Schichtaufbau des Untergrunds. Solche Apparate sind bei der Exploration anderer Rohstoffe am Meeresboden der



2.22 > Unscheinbar, aber ausgesprochen attraktiv für Bergbau- und Metallkonzerne: Kobaltkrusten am Meeresboden.

Stand der Technik. Geräte, die allerdings so präzise arbeiten, dass sie die Kobaltkrusten zentimetergenau vermessen und vom Fels unterscheiden können, gibt es noch nicht.

Ein alternatives Verfahren wären Gammastrahlungsdetektoren, die heute bereits an Land für die Vermessung von Gesteinsschichten eingesetzt werden. Viele Gesteine enthalten Radionuklide, also instabile Atome, die zerfallen können und dabei radioaktive Strahlung, Gammastrahlung, abgeben. Diese Strahlung nehmen die Detektoren wahr. Da in jedem Gestein Radionuklide in unterschiedlicher Kombination oder Zahl enthalten sind, kann man verschiedene Gesteine anhand ihres Gammastrahlungsmusters voneinander unterscheiden. Auch die Krusten und die darunterliegenden Vulkangesteine der Seeberge unterscheiden sich deutlich in der Mischung der Radionuklide. Da dieses Verfahren sehr präzise ist, ließe sich die Dicke von Kobaltkrusten sehr gut erfassen. Noch aber gibt es keine entsprechenden Detektoren für den Routineeinsatz in der Tiefsee.

Nicht viel mehr als Konzeptstudien

Unklar ist bislang auch, wie die Krusten zukünftig überhaupt in großen Mengen abgebaut werden sollen. Bislang gibt es lediglich Konzeptentwürfe und Laborversuche.

Unter anderem arbeiten Ingenieurbüros an Raupenfahrzeugen, die mit einer Art Meißel die Krusten vom Gestein abspalten und über feste Spezialschläuche an die Wasseroberfläche zum Schiff pumpen. Fachleute schätzen, dass für einen wirtschaftlichen Abbau jährlich mehr als 1 Million Tonnen Kobaltkrustenmasse gefördert werden müsste. Das lässt sich vermutlich nur erreichen, wenn die Krusten eine Dicke von mindestens 4 Zentimetern haben. Entsprechend leistungsfähig sollten die Raupenfahrzeuge sein. Zudem müssen sie im teilweise unwegsamen Gelände an den Hängen der Seeberge arbeiten können.

Für den Abbau der Kobaltkrusten – und ebenfalls der Manganknollen – bleibt auch der Transport der Mineralien vom Meeresboden zum Schiff eine Herausforderung. Pumpen und Ventile müssen extrem verschleißarm sein, um den hohen Beanspruchungen standhalten zu können. Ingenieure testen die Strapazierfähigkeit von Schläuchen und Pumpenprototypen derzeit unter anderem mit Glasmurmeln, Kies und Schotter. Bis aber ein Prototyp einer Förderanlage mitsamt Raupenfahrzeug, Pumpentechnik und Förderstrang realisiert ist, dürften noch mindestens 5 Jahre vergehen.

Artenreiche Seeberge

Im Hinblick auf den Umweltschutz ist durchaus positiv zu bewerten, dass technische Lösungen zum wirtschaftlichen Abbau noch nicht vorhanden sind, denn noch ist ungeklärt, wie stark der Abbau von Kobaltkrusten die Tiefseelebensräume schädigen wird. Bis heute wurden weltweit erst einige Hundert Seeberge von Meeresbiologen genauer untersucht. Viele Meeresregionen und damit auch Seeberge sind in biologischer Hinsicht noch völlig unerforscht. Die Biologen halten es daher für erforderlich, weitere Gebiete und Lebensgemeinschaften auf Seebergen zu untersuchen, ehe der Abbau der Krusten startet. Je später er beginnt, desto mehr Zeit bleibt ihnen dafür.

Bekannt ist, dass sich die Artenzusammensetzung der Seeberge von Meeresgebiet zu Meeresgebiet deutlich unterscheidet. Wie bei Bergen an Land, die je nach geographischer Lage und Höhe verschiedenen Arten unterschiedliche Lebensräume bieten, unterscheidet sich die Artenzusammensetzung und -vielfalt auch bei den Seebergen. In der Vergangenheit wurde angenommen, dass hier

besonders viele endemische Arten vorkommen. Neuere Studien können diese Vermutung nicht belegen.

Seeberge sind auch für frei schwimmende Lebewesen von Bedeutung. Das ist vermutlich auf die besonderen Meeresströmungen hier zurückzuführen. Zum einen werden Nährstoffe durch die kreisenden Strömungen am Seeberg gehalten. Zum anderen wird nährstoffreiches Wasser durch die Strömungen an den Seebergen aus der Tiefe heraufbefördert, was zu verstärktem Planktonwachstum führt. Haie oder auch Thunfische kommen aufgrund dieses Nahrungsangebots an Seebergen zum Teil in großer Zahl vor – beispielsweise im Südwestpazifik. Diese Seeberggebiete sind daher auch für den Thunfischfang von großer Bedeutung.

Angesichts der geschätzten Gesamtzahl von mindestens 33 000 Seebergen weltweit ist das Wissen über sie noch immer verhältnismäßig lückenhaft, weil erst wenige Seeberge genauer untersucht wurden. Um wenigstens grob abschätzen zu können, wie vielfältig die Tiefsee ist und wie stark sich Tiefseelebensräume weltweit voneinander unterscheiden, wurde im Auftrag der UNESCO der GOODS-Report (Global Open Oceans and Deep Sea-habitats) über weltweite Meeres- und Tiefseelebensräume ausgearbeitet, der 2009 veröffentlicht wurde.

Dieser Report teilt die Meere in verschiedene Bioregionen ein. Dabei wird insbesondere auch die Tiefe berücksichtigt. Für den Tiefenbereich von 800 bis 2500 Metern, in dem weltweit auch die dicksten und ergiebigsten Krusten vorkommen, definiert der Report 14 Bioregionen. Grundlage dieser Einteilung sind biologische Informationen von Tiefseeexpeditionen sowie ozeanographische Parameter wie etwa der Kohlenstoff-, Salz- und Sauerstoffgehalt oder die Temperatur in bestimmten Tiefen. Berücksichtigt wurde außerdem die Struktur des Meeresbodens, die Topographie. Dazu gehören flache Tiefseebereiche, hydrothermale Quellen oder Seeberge. Zwar ist diese Einteilung noch sehr grob, wie auch die Autoren der Studie einräumen, dennoch hilft der GOODS-Report dabei, einzuschätzen, welche Lebensräume in welcher Meeresregion zu erwarten sind.

Viele Tierarten, die auf oder an Seebergen leben, sind auch dadurch charakterisiert, dass sie extrem langsam wachsen und nur wenige Nachkommen zeugen – die Kaltwasserkorallen etwa, die die Tiefsee bewohnen, leben

mehrere Hundert, sogar bis zu 1000 Jahre. Auch manche Tiefseefische werden mehr als 100 Jahre alt. Sie werden erst mit etwa 25 Jahren geschlechtsreif und produzieren nur wenige Eier. Oftmals kommen solche Arten an einem Seeberg in verhältnismäßig großer Zahl vor. Weil sie nur wenige Nachkommen zeugen, sind sie durch Fischfang oder die Zerstörung ihres Lebensraums besonders gefährdet. Sterben die Elterntiere, gibt es kaum noch Nachwuchs, durch den sich der Bestand erholen könnte.

Untersuchungen bei Australien und Neuseeland haben gezeigt, dass sich die Fauna an Seebergen nur sehr langsam von Eingriffen erholt. So hat man zum Beispiel festgestellt, dass jene Gebiete, in denen Schleppnetze eingesetzt worden waren, sich selbst nach einer 10- bis 30-jährigen Ruhephase als deutlich artenärmer erwiesen als jene Areale, die von Schleppnetzfischerei gänzlich verschont geblieben sind.

Nahezu unerforscht – das Leben auf den Kobaltkrusten

Bis heute gibt es erst wenige Expeditionen, in deren Rahmen explizit die Lebensräume auf Kobaltkrusten untersucht worden sind. Ein Beispiel sind die Studien, die Japan zwischen 1987 und 1999 gemeinsam mit SOPAC-Mitgliedsstaaten durchgeführt hat (Secretariat of the Pacific Community Applied Geoscience and Technology Division, eine Abteilung für angewandte Geowissenschaften und Technologie des Sekretariats der Pazifischen Gemeinschaft). Ziel dieser Expeditionen war es, die Lebensräume auf den verschiedenen mineralischen Ressourcen im Meer – den Kobaltkrusten, Manganknollen und Massivsulfiden – in den Ausschließlichen Wirtschaftszonen der Inselstaaten Kiribati, Marshallinseln, Mikronesien, Samoa und Tuvalu zu untersuchen. Um die Lebewesen zu bestimmen, wurden Tausende von Unterwasserfotos gemacht. Zwar waren die fotografierten Gebiete mit 0,35 bis 2 Hektar vergleichsweise klein, dennoch entdeckten die Forscher eine große Vielfalt an Lebewesen. In der Größenklasse der Megafauna (größer als 2 Zentimeter) fanden sich viele festsitzende – sessile – Arten wie etwa Korallen und Schwämme. Hinzu kamen Seefedern und filigrane Kolonien kleiner Polypen. Da der Lebensraum Seeberg durch felsigen Untergrund und starke Strömungen geprägt

2.23 > Xenophyphoren sind wenig erforschte einzellige Lebewesen, die in der Tiefsee leben, oftmals an Hängen von Seebergen. Dieses Exemplar hat eine Größe von 20 Zentimetern.



ist, sind solche Organismen gut an diesen Lebensraum angepasst. Alle diese Lebewesen zählen zu den Filtrierern, die Nahrungsteilchen aus dem Wasser sieben. Für sie sind Seeberge ein idealer Lebensraum, weil die Meeresströmung die Nahrung heranträgt. Des Weiteren fanden sich auf den Fotografien Krebse, Seesterne, Seegurken und Tintenfische sowie mehrere Zentimeter große Xenophyphoren, Einzeller, die für gewöhnlich weniger als 1 Millimeter groß sind.

Die Folgen des Bergbaus abschätzen

Wissenschaftler fordern, die Lebensräume an den Seebergen, die reich an Kobaltkrusten sind, noch viel genauer zu untersuchen, bevor der Meeresbergbau dort überhaupt beginnt. Das betrifft vor allem die Inselstaaten im Südwestpazifik, in deren Hoheitsgebieten sich die ergiebigsten Krusten befinden. Nach den gemeinsamen Studien mit Japan führen die SOPAC-Mitglieder derzeit weitere Forschungen an bislang wenig untersuchten Seebergen durch. Da Kobaltkrusten auf Erhebungen im Meer beschränkt sind, wird ihr Abbau, verglichen mit dem der

Manganknollen, kleinräumiger sein. Auch die dabei entstehende Trübewolke dürfte deutlich kleiner sein als bei der Ernte von Manganknollen, weil kein weiches Sediment aufgewirbelt wird. Noch ist unklar, wie sich der Kobaltkrustenabbau künftig im Einzelnen auswirken könnte. Nach Ansicht von Experten ist mit folgenden Störungen zu rechnen, die denen des Manganknollenabbaus sehr ähneln:

- Die Maschinen, mit denen die Krusten abgetragen werden, wirbeln Gestein und Partikel auf. Zwar dürfte diese Partikelwolke nicht so groß wie beim Manganknollenabbau sein, aber grundsätzlich besteht auch hier die Gefahr, dass die Wolke verdriftet und andere Lebensräume schädigt.
- Im abgeernteten Bereich werden alle festsitzenden Organismen zerstört, also die auf den Kobaltkrusten vorherrschenden Organismengruppen.
- Durch den Einsatz von Erntemaschinen sowie das Heraufpumpen und Reinigen der Krustenbruchstücke entstehen Lärm und Vibrationen, die Delfine und Wale stören und verdrängen können.



2.24 > Im Querschnitt ist die schwarze, mehrere Zentimeter dicke Kobaltkruste auf dem hellen Vulkan-
gestein gut erkennbar. Das Gestein stammt aus der Louisville-
Seebergkette im Süd-
westpazifik, zu der
mehr als 70 Seeberge
gehören.

- Das bei der Ernte der Krusten anfallende Abwasser wird von den Schiffen ins Meer eingeleitet. Auch dadurch entsteht eine Sedimentwolke.
- Die Lichter auf den Schiffen und an den Erntemaschinen können Meeresvögel, Fische und Meeressäuger stören.
- Durch die Entsorgung herkömmlicher Schiffsabfälle wird das Meer verschmutzt.

Befürworter des Abbaus betonen, dass Manganknollen und Kobaltkrusten in dünnen Lagen direkt auf dem Meeresboden beziehungsweise auf den Seebergen liegen. Anders als Erze an Land sind sie damit eine zweidimensionale Ressource, die sich theoretisch ohne großen Aufwand gewinnen lässt. An Land werden Erze hingegen in Bergwerken oder in gigantischen Tagebauen abgebaut, in denen sich die Maschinen mehr als 100 Meter tief in die Erde graben. Millionen Tonnen Erdreich (Abraum) müssen für die Gewinnung dieser dreidimensionalen Reserven abgetragen und bewegt werden, bevor das eigentliche Erz gewonnen wird. Dadurch werden ganze Regionen zerstört, Menschen verlieren ihre Heimat. Der Meeres-

bergbau wäre hingegen ein vergleichsweise kleiner Eingriff, weil man nur die Oberfläche des Meeresbodens beziehungsweise des Seebergs abträgt. Infrastrukturen wie Straßen oder Tunnel sind nicht nötig. Auch Abraumhalden gibt es nicht.

Weil es an ausführlichen meeresbiologischen Studien fehlt, lassen sich die Vor- und Nachteile des Meeresbergbaus bis heute kaum abwägen. Noch ist unklar, wie stark der Bergbau das Leben im Meer verändern wird und welche Konsequenzen er letztlich für den Menschen und die Fischerei haben wird. Offene Fragen wie diese wird man nur durch weitere intensive Forschung und eine entsprechende finanzielle Unterstützung von Expeditionen klären können.

Einige Forscher, vor allem auch kritische Biologen, fordern, vor dem Beginn des industriellen Abbaus in Pilotprojekten größere Versuchsflächen abzuernten, um überhaupt einschätzen zu können, wie sich ein Abbau in großem Stil möglicherweise auswirkt. Wissenschaftsministerien oder beispielsweise die Europäische Union könnten einen solchen großflächigen Probeabbau finanziell unterstützen.

Massivsulfide – im Rauch der Tiefe

> 1979 entdeckte man im Pazifik heiße Quellen, an denen sich metallhaltige Schwefelverbindungen ablagern, sogenannte Massivsulfide. Heute weiß man, dass sie weltweit vorkommen. Zwar sind die bisher gefundenen Mengen bei Weitem nicht so groß wie die der Kobaltkrusten und Manganknollen, sie weisen aber zum Teil deutlich höhere Gehalte an Kupfer, Zink, Gold und Silber auf. Vor Papua-Neuguinea könnte der Abbau schon 2016 beginnen.

Ein extrem heißer Wasserstrahl

Außer Manganknollen und Kobaltkrusten findet man im Meer noch eine dritte metallhaltige mineralische Ressource: die Massivsulfide. Diese bestehen aus Schwefelverbindungen, Sulfiden, die am Meeresboden ähnlich wie Kobaltkrusten massive Ablagerungen bilden, daher der Name. Massivsulfide entstehen an heißen ozeanischen Quellen, aus denen mit Sulfiden angereichertes Wasser aus dem Untergrund ins Meer strömt.

Solche heißen Quellen werden Hydrothermalquellen genannt, die man entlang von Plattengrenzen und an aktiven Vulkanen im Meer findet, wo durch das Zusammenwirken von vulkanischer Aktivität und Meerwasser ein Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Gesteinen der Erdkruste und dem Ozean stattfindet. Durch Spalten

am Meeresboden dringt Meerwasser bis zu mehrere Tausend Meter tief in den Untergrund ein. Das Meerwasser wird in der Tiefe durch vulkanische Aktivität auf bis zu rund 400 Grad Celsius aufgeheizt und löst Metalle und Schwefel aus dem umgebenden Vulkangestein. Da das heiße Wasser eine geringere Dichte als das kühlere Wasser darüber hat, steigt es schnell auf und fließt zurück ins Meer. Im Meerwasser kühlt die Heißwasserwolke sehr schnell ab. Dabei verbinden sich die im Wasser gelösten Metalle zu feinen Sulfidpartikeln und sinken als feiner Niederschlag zu Boden.

An vielen Hydrothermalquellen weltweit haben sich die Sulfide an den Austrittsstellen zu mehrere Meter hohen schornsteinartigen Strukturen aufgetürmt. Das Wasser schießt wie ein Fontäne aus den Röhren ins Meer. Dabei lagert sich nach und nach weiteres Material am Rand der Röhren ab, sodass sie weiter in die Höhe wachsen. Diese Strukturen werden aufgrund ihres Aussehens auch als Raucher bezeichnet. Da das austretende Wasser in den meisten Fällen durch die Mineralien schwarz gefärbt ist, spricht man hier auch von Schwarzen Rauchern.

1979 wurden die ersten Schwarzen Raucher während einer Expedition zum **Ostpazifischen Rücken** entdeckt. Sie waren nicht nur für Geologen eine Sensation, sondern auch für Biologen, denn sie werden von vielen Tierarten bevölkert. Mit so viel Leben in der Tiefsee hatte kaum ein Wissenschaftler gerechnet. Damals galt die Tiefsee noch als öde und leer.

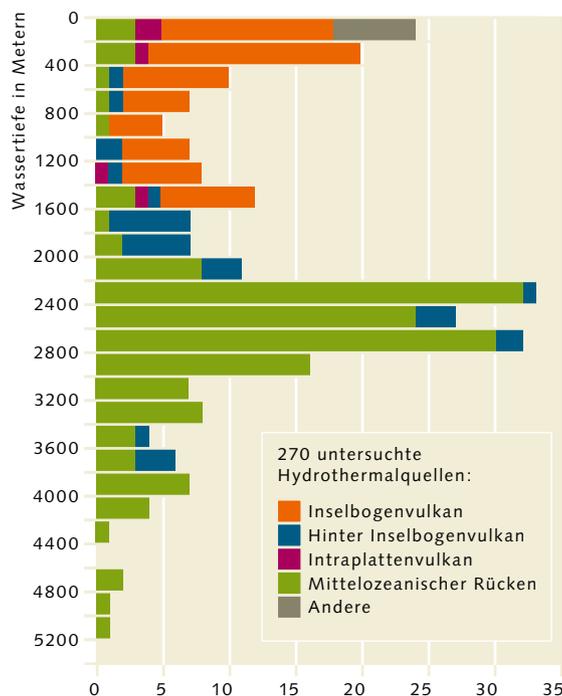
Heiße Quellen wurden inzwischen in allen Ozeanen gefunden. Sie bilden sich überwiegend in Wassertiefen von 1000 bis 4000 Metern.

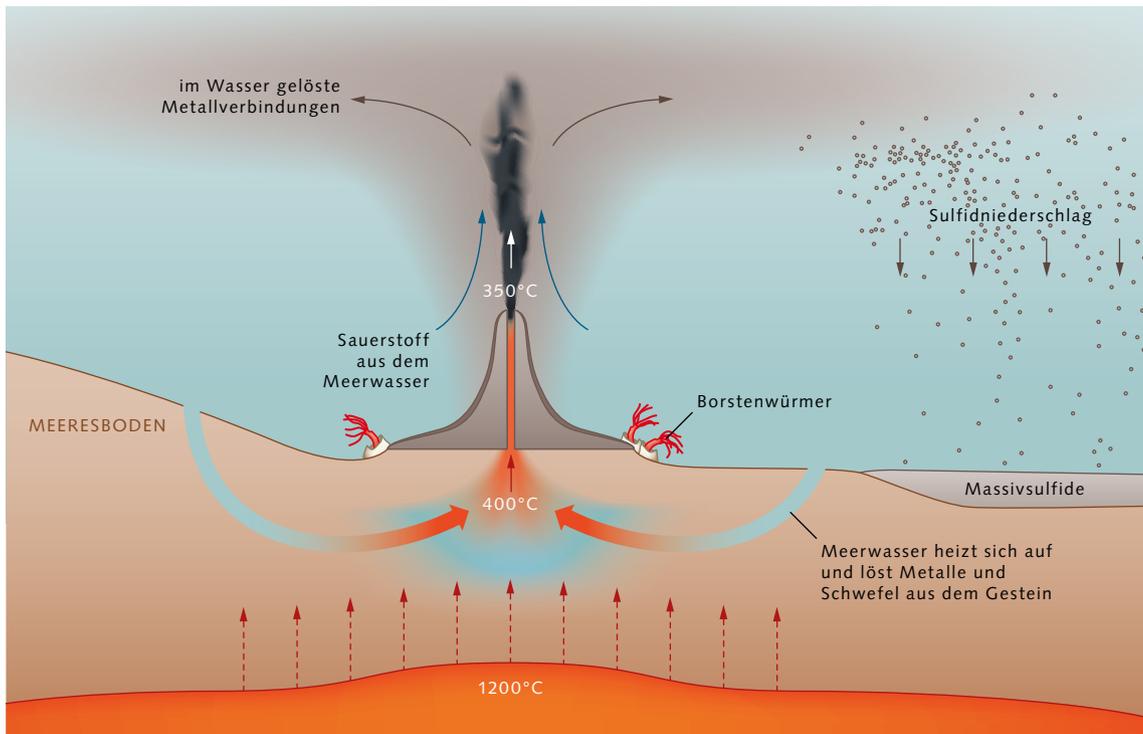
Massivsulfide kommen weltweit an Plattengrenzen vor. Geologen unterscheiden 4 verschiedene typische Entstehungsgebiete von Hydrothermalquellen und damit auch Massivsulfiden:

Sulfide

Sulfide sind chemische Verbindungen aus Schwefel und Metall. In Massivsulfiden kommen unter anderem Eisensulfid (Pyrit), Kupfersulfid (Chalkopyrit), Zinksulfid (Sphalerit) und Sulfide anderer Metalle wie Gold und Silber vor. Besonders der relativ hohe Gehalt an Edelmetallen macht die Massivsulfide für den Meeresbergbau interessant.

2.25 > Verteilung der Hydrothermalquellen nach Tiefe und Entstehungsort.





2.26 > Raucher entstehen in magmatisch aktiven Meeresregionen. Durch Risse im Meeresboden sickert Wasser mehrere Tausend Meter tief in den Untergrund. In der Nähe von Magma-kammern erwärmt es sich auf bis zu rund 400 Grad Celsius und löst Mineralien aus dem Gestein. Aufgrund seiner geringen Dichte steigt es auf und schießt über die Raucher zurück ins Meer. Durch die Reaktion mit dem kalten Meerwasser bilden sich Mineralienpartikel, die sich in den Kaminen der Raucher oder auf dem Meeresboden ablagern.

AN MITTELOZEANISCHEN RÜCKEN: Mittelozeanische Rücken sind Gebirgszüge im Meer, die sich wie die Naht eines Baseballs um den ganzen Globus ziehen. Hier driften ozeanische Platten auseinander. Dabei entstehen Risse, durch die Wasser in die Tiefe sinkt und sich an Magma-kammern aufheizt.

AN INSELBOGENVULKANEN: Inselbogenvulkane entstehen, wenn sich eine ozeanische Platte im Meer unter eine andere schiebt. Dabei wird in der Tiefe Gestein geschmolzen, das als Magma aufsteigt. Mit der Zeit wächst ein Vulkan in die Höhe. Solange der Vulkan die Meeresoberfläche nicht erreicht, spricht man von einem Seeberg. Im Gipfelbereich solcher untermeerischen Vulkane können sich Hydrothermalquellen bilden. Viele Südseeinseln im Südwestpazifik sind durch dieses Abtauchen von ozeanischen Platten, der sogenannten Subduktion, und das Aufsteigen von Magma entstanden. Da entlang der abtauchenden Platte meist mehrere Vulkane nebeneinander entstehen und diese Vulkanketten aufgrund der Kugel-form der Erde Bögen ausbilden, werden diese auch Inselbögen genannt.

HINTER INSELBOGENVULKANEN (Backarc-Becken): Wenn eine Platte unter eine andere abtaucht, entstehen in der oberen Platte Spannungen. Die obere Platte wird von der abtauchenden unteren Platte ausgedünnt, auseinandergezogen und reißt dann auf. Diese Art von Spannungen tritt in vielen Fällen mehrere Dutzend Kilometer hinter den aktiven Inselbogenvulkanen auf. Aus diesem Grund spricht man im Englischen vom back-arc basin (arc = Bogen).

AN INTRAPLATTENVULKANEN: Vulkane entstehen nicht nur an Plattenrändern oder in Subduktionszonen, sondern auch mitten in einer Platte. In solchen Fällen steigt Magma durch Risse im Untergrund auf und brennt sich wie ein Schneidbrenner durch die Erdkruste. Da diese Vulkane punktuell entstehen, spricht man auch von Hotspots. Auch an solchen Hotspots sind vereinzelt Hydrothermalquellen zu finden. Ein Beispiel für Intraplattenvulkane ist die Inselgruppe von Hawaii. Sie ist entstanden, als die ozeanische Platte langsam über den Hotspot gewandert ist. Punkt für Punkt ist Magma durchgedrungen und hat sich zu Inseln auftürmt.

Schwarz, weiß, grau und manchmal sogar gelb

Zwar spricht man im Allgemeinen von Massivsulfiden, doch finden sich streng genommen in den Ablagerungen der Hydrothermalquellen 3 unterschiedliche Typen von Schwefelverbindungen: Sulfide, Sulfate und reiner Schwefel. Welche Verbindungen vorherrschen, hängt von der Temperatur der Hydrothermalquelle sowie den chemischen Bedingungen in der Hydrothermalflüssigkeit ab. Die heißeste Quelle, die heute bekannt ist, hat eine Temperatur von 407 Grad Celsius. In den anderen liegt die Austrittstemperatur meist deutlich darunter. In heißen Quellen mit Temperaturen zwischen 330 und 380 Grad Celsius kommen vor allem Sulfide vor. Da diese Schwefelverbindungen schwarz sind, spricht man von Schwarzen Rauchern. An Weißen Rauchern hingegen herrschen Temperaturen von weniger als 300 Grad Celsius. Hier überwiegen weiße Sulfatverbindungen. Darüber hinaus gibt es Graue Raucher, die sowohl Sulfide als auch Sulfate ausstoßen. In manchen Regionen kommen auch Gelbe Raucher vor. Sie finden sich an aktiven Vulkanen. Die Wassertemperaturen betragen hier weniger als 150 Grad Celsius, und es tritt reiner gelber Schwefel aus.

Ungezählte Hydrothermalquellen

Bis heute hat man bei Expeditionen in der Tiefsee rund 187 aktive Hydrothermalquellen mit Massivsulfiden entdeckt. Hinzu kommen 80 erkaltete Hydrothermalquellen, die nicht mehr aktiv sind. Gleichwohl sind auch hier Massivsulfide zu finden, die sich in früheren Zeiten am Meeresboden abgelagert haben. Außerdem sind 30 Orte bekannt, an denen hochtemperierte Hydrothermallösungen austreten, sich aber an der Oberfläche keine Massivsulfide gebildet haben. Hier könnten sich allerdings im Untergrund Sulfidvorkommen befinden. Insgesamt sind heute also rund 300 Hydrothermalquellen beziehungsweise Massivsulfidvorkommen bekannt. 58 Prozent davon finden sich an Mittelozeanischen Rücken, 26 Prozent kommen in den Spreizungszonen der Backarc-Becken, 16 Prozent an Inselbogenvulkanen und 1 Prozent an Intraplattenvulkanen vor.

Forscher gehen davon aus, dass die Zahl der Hydrothermalquellen und damit auch der Massivsulfide weltweit noch deutlich größer ist. Grundlage dieser Schätzungen ist der geothermische Wärmefluss der Erde. So ist heute genau bekannt, wie viel Wärme im Erdinneren entsteht und durch Magmatismus und Vulkanismus freigesetzt wird. Diese Wärmemenge beträgt 1,8 Billionen Watt,

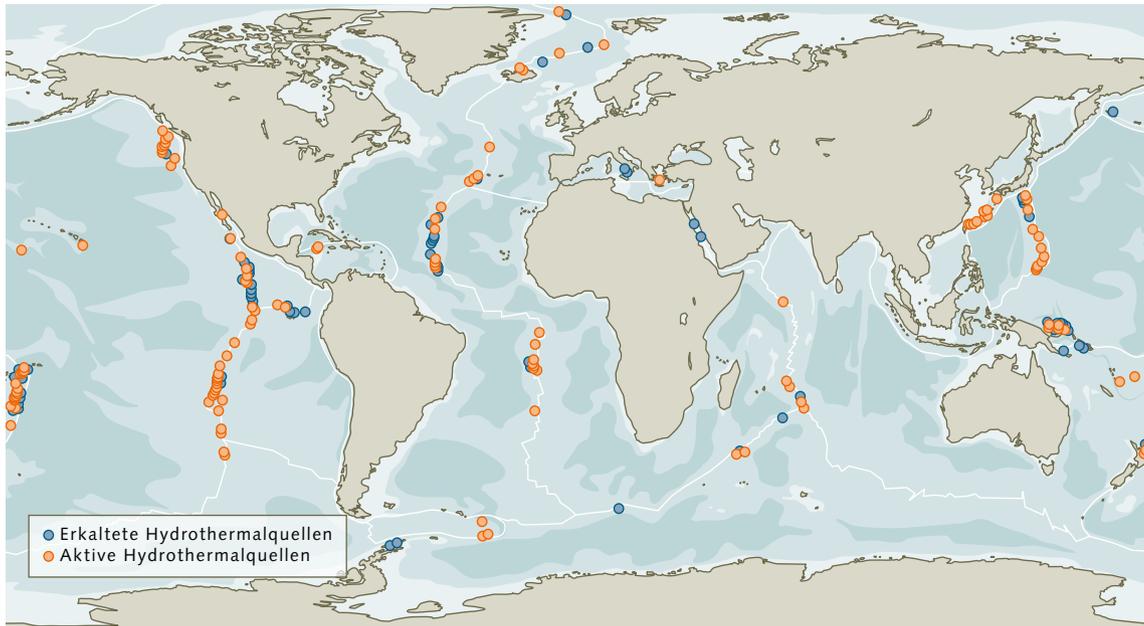
was der Leistung von 1 Million Atomkraftwerken entspricht. Ein Teil dieser Wärmemenge, so die Schätzungen, wird durch Hydrothermalquellen freigesetzt. Nach entsprechenden Berechnungen gehen einige Forscher davon aus, dass sich auf jedem Kilometer eines Mittelozeanischen Rückens oder einer Backarc-Spreizungszone 1 Hydrothermalquelle befindet. Bedenkt man, dass die Mittelozeanischen Rücken und Backarc-Spreizungszonen zusammen eine Gesamtlänge von rund 67 000 und die Inselbogenvulkane von rund 22 000 Kilometern haben, könnte es weltweit rund 90 000 Hydrothermalquellen geben. Forscher nehmen an, dass alle 50 bis 100 Kilometer eine große Fläche zu finden ist, die aus bis zu 100 Rauchern bestehen kann. Insgesamt rechnet man damit, dass weltweit an rund 500 bis 1000 Stellen große Massivsulfidvorkommen entstanden sind.

Doch die Größe und der Metallgehalt von Massivsulfiden sind schwer messbar. Das liegt daran, dass sich die Heißwasserwolke, die aus aktiven Rauchern austritt, schnell ausbreitet und die Sulfide zum Teil mit der Strömung fortgetragen werden. So können große Massivsulfidflächen mit Ausdehnungen von 10 bis zu Hunderten Metern entstehen, die einige Millionen Tonnen Massivsulfide enthalten. Wie groß ein Vorkommen ist, lässt sich auf den ersten Blick aber nicht erkennen, sondern nur durch Bodenproben oder Bohrungen feststellen. Auch der Metallgehalt kann nur durch eine solche aufwendige Probenahme sicher bestimmt werden.

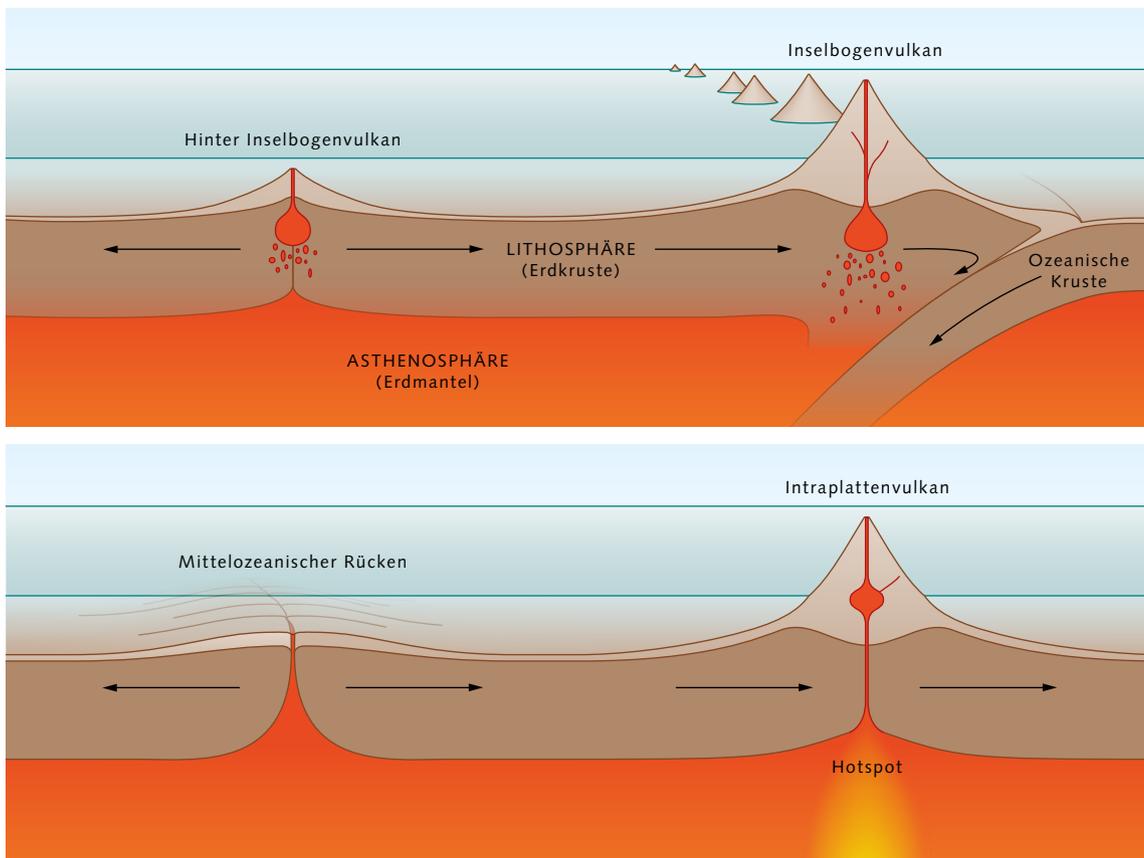
Aufgrund vieler Bodenanalysen, die in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführt wurden, gehen Forscher heute davon aus, dass sich nur an wenigen Hydrothermalquellen Massivsulfidvorkommen befinden, die begehrte Metalle wie Kupfer und Gold enthalten und tatsächlich groß genug für einen wirtschaftlichen Abbau sind. Hinzu kommt, dass viele Regionen unwegsam und für die Abbaugeräte ungeeignet sind.

Geologische Untersuchungen haben gezeigt, dass sich große Vorkommen nur dann bilden können, wenn eine oder mehrere der folgenden Voraussetzungen erfüllt ist oder sind:

- Die Hydrothermalquelle war mindestens mehrere Zehntausend Jahre aktiv, sodass sich ausreichend Material ansammeln konnte.



2.27 > Die Zahl hydrothermaler Quellen lässt sich nur schwer bestimmen, da diese über den ganzen Globus verteilt sind. Sicher bekannt sind 187 aktive und 80 inaktive Hydrothermalquellen, an denen sich Massivsulfide gebildet haben.



2.28 > Hydrothermalquellen entstehen in verschiedenen magmatisch aktiven Gebieten, in denen Wasser in die Tiefe dringt und aufgeheizt wird. Zu diesen Gebieten zählen zum Beispiel Inselbogenvulkane, die entstehen, wenn in die Tiefe abtauchendes Gestein aufgeschmolzen wird. Hinter Inselbogenvulkanen reißt der Untergrund durch Spreizungsbewegungen der Erdkruste auf, sodass Magma aufsteigen kann. Mittelozeanische Rücken entstehen durch das Auseinanderdriften von ozeanischen Platten. Intraplattenvulkane wiederum bilden sich an Schwachstellen in der Erdkruste.

Die mühevollen Suche nach Hydrothermalquellen und ergiebigen Massivsulfidvorkommen

Viele Hydrothermalquellen wurden durch Zufall bei Expeditionen in magmatisch aktiven Meeresgebieten gefunden. Die Suche nach neuen Hydrothermalquellen ist schwierig, weil man im weiten Ozean Areale mit Durchmessern von nur einigen 10 bis 100 Metern finden muss. Für die Suche setzen Meeresforscher meist Sensoren ein, die vom Schiff an einem Stahlseil herabgelassen werden. Die Sensoren können Heißwasserwolken wahrnehmen, indem sie die Trübung des Wassers, die Temperatur oder chemische Signale messen. So sind allerdings nur punktuelle Messungen an einem Ort möglich. Daher kommen seit einigen Jahren verstärkt autonome Unterwasserfahrzeuge zum Einsatz (Autonomous Underwater Vehicles, AUV). Die torpedoförmigen AUVs sind ebenfalls mit diesen Sensoren ausgestattet. Sie sind in der Lage, frei im Wasser zu schwimmen und automatisch bis zum Meeresboden zu tauchen. Nach Beendigung ihres etwa 20-stündigen Einsatzes kehren sie zum Schiff zurück.

Mithilfe der AUVs wurden pro Forschungsreise bereits bis zu 10 neue Heißwasserwolken entdeckt. Allerdings lässt sich damit nicht der genaue Ort der Quelle bestimmen. Zudem bleibt offen, ob sich am Meeresboden tatsächlich eine hydrothermale Quelle mit sulfidreichen Schwarzen Rauchern befindet. Dies lässt sich nur durch den Einsatz von geschleppten Kameras, mit Kameras auf Tauchbooten bzw. Tauchrobotern oder mit Sonargeräten feststellen, die mithilfe akustischer Signale die einzelnen Schornsteine abbilden können. Forscher unterscheiden deshalb zwischen sicher nachgewiesenen und unbestätigten Hydrothermalquellen. Derzeit sind neben den geläufigen Vorkommen weitere rund 200 unbestätigte Hydrothermalquellen bekannt.

Auch alte Massivsulfidvorkommen an erkalteten Hydrothermalquellen lassen sich am ehesten durch Kamerabeobachtungen in der Tiefe bestimmen. Ein wichtiger Anhaltspunkt dabei sind Verfärbungen am Meeresboden wie etwa Rost, der auf Eisen hindeutet. Die Größe eines solchen Vorkommens wird dann zunächst grob abgeschätzt. Unter anderem überprüfen Forscher, ob das Vorkommen höher liegt als der umgebende Meeresboden, und schätzen damit die Dicke ab. Mithilfe von Erfahrungswerten wird dann die Dichte des Sulfids veranschlagt. Aus der Größe des Vorkommens und der Dichteschätzung leiten die Forscher dann die ungefähre Tonnage ab.

Heute weiß man, dass diese Abschätzungen mithilfe von Unterwasseraufnahmen häufig viel zu hoch waren, denn schon oft zeigten nachträgliche Analysen, dass im Boden kaum Sulfide vorhanden waren. Da Bohrungen sehr aufwendig sind, bleibt es aber

oft bei dieser ersten Einschätzung. Hinzu kommt, dass man heute nur wenig darüber weiß, wie die Metalle in den Massivsulfidvorkommen verteilt sind. In manchen Gebieten wurde festgestellt, dass die Metalle vor allem an der Oberfläche der Vorkommen angereichert sind und ihre Konzentration im Inneren des Vorkommens stark abnimmt. Ein Vorkommen ist aber nur dann lohnend, wenn sowohl die Tonnagen als auch die Gehalte an begehrten Metallen groß genug sind. Viele heute bekannte Vorkommen erfüllen diese Voraussetzungen nicht.

Andererseits gehen Wissenschaftler davon aus, dass in der Weite der Tiefsee viele alte Massivsulfidvorkommen versteckt sind, die wirtschaftlich durchaus interessant sein könnten. Zwar sind die vulkanisch aktiven Zonen, in denen sich auch die aktiven Hydrothermalquellen befinden, meist nur wenige Kilometer breit. Da aber der ganze Ozean letztlich durch diese vulkanische Aktivität entstanden ist, muss es überall im Meer alte Massivsulfidvorkommen geben. Viele dieser Vorkommen dürften im Laufe der Zeit von mächtigen Sedimentschichten jüngerer Datums überdeckt worden sein. Daher ist es schwierig oder vielleicht sogar ganz unmöglich, diese zu entdecken. Selbst wenn man sie fände, wäre der Abbau nur dann wirtschaftlich, wenn die Sedimentschichten dünn und ohne großen Aufwand abzutragen wären.



2.29 > Ein Mitarbeiter eines Forschungsschiffs setzt ein autonomes Unterwasserfahrzeug (AUV) ins Meer, das mit Sensoren bestückt ist.

- Die Platten an den Mittelozeanischen Rücken oder in den Backarc-Becken dürfen sich nur sehr langsam auseinanderbewegen. Andernfalls würden ständig neue Risse mit vielen kleinen Quellen entstehen, sodass sich nirgends Sulfide in größerer Menge anreichern können. Hochrechnungen zeigen, dass 86 Prozent aller Massivsulfidvorkommen an Bruchstellen auftreten, an denen Platten mit einer geringen Geschwindigkeit von maximal 4 Zentimetern pro Jahr auseinanderdriften. An Bruchstellen, an denen die Platten mit einer Geschwindigkeit von 4 bis 8 Zentimetern pro Jahr auseinanderdriften, finden sich nur 12 Prozent der Massivsulfidvorkommen. Zudem sind diese meist kleiner. An Bruchstellen mit noch schneller auseinanderdriftenden Platten (mehr als 8 Zentimeter pro Jahr) gibt es nur wenige Massivsulfidvorkommen.
- Die Hydrothermalquelle ist von Sedimenten bedeckt, in denen sich die von unten aus dem Untergrund aufsteigenden Sulfide anreichern. In diesem Fall bilden sich die feinen Sulfidpartikel, wenn das heiße Hydrothermalwasser mit dem kühleren Wasser in den Poren des Sediments reagiert. Da die Sulfide anders als bei den Rauchern nicht durch die Wasserströmung verteilt werden, können sich in solchen Sedimenten Metalle stark anreichern. Allerdings sind nur wenige solcher Lagerstätten bekannt.

Edler als Knollen und Krusten

Verglichen mit den vielen Milliarden Tonnen Manganknollen und Kobaltkrusten, sind die geschätzten Mengen an Massivsulfiden mit insgesamt einigen Hundert Millionen Tonnen deutlich kleiner. Allerdings ist die Schätzung der Gesamtmenge ausgesprochen schwierig, weil man bis heute erst einen Bruchteil der Gesamtvorkommen entdeckt hat. Hinzu kommt, dass vermutlich nicht alle der geschätzten 500 bis 1000 großen Vorkommen wertvolle Metalle liefern werden. Die Massivsulfidvorkommen des Ostpazifischen Rückens und teilweise auch des Mittelatlantischen Rückens etwa enthalten vor allem Eisensulfid, das keinen ökonomischen Wert hat.

Ein Beispiel für wirtschaftlich interessante Massivsulfide sind die Vorkommen in der Bismarcksee östlich von Papua-Neuguinea. Diese weisen hohe Gehalte an Kupfer

Gebiet	Gold (Au) in Gramm pro Tonne	Silber (Ag) in Gramm pro Tonne
Manganknollen in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ)	0,0045	0,17
Kobaltkrusten in der Primären Krustenzone (PCZ)	0,013	4
Massivsulfide in Solwara 03 (zentrales Manus-Becken)	15,2	642
Massivsulfide in Solwara 09 (östl. Manus-Becken)	19,9	296
Massivsulfide in Solwara 18 (westl. Manus-Becken)	0,2	110

und Zink auf. Auch die Gehalte an Gold und Silber sind beachtlich. Die Konzentration von Gold liegt hier in manchen Vorkommen bei rund 15 Gramm pro Tonne. Das ist etwa 3-mal so viel wie in typischen Landlagerstätten. Der Silbergehalt liegt in vielen Fällen zwischen 100 und 300 Gramm pro Tonne, wobei Spitzenwerte mit sogar 642 Gramm pro Tonne aus dem sogenannten Solwara-Feld in der westlichen Bismarcksee bekannt sind. Das ist deutlich mehr als bei den Manganknollen und den Kobaltkrusten, die Werte von nur etwa 1 Gramm Silber pro Tonne erreichen. An Land liegen die höchsten Gehalte übrigens bei 100 bis 160 Gramm Silber pro Tonne.

Viele chemische Elemente sind in Massivsulfiden oft nur in relativ geringen Mengen enthalten, darunter Mangan, Bismut, Cadmium, Gallium, Germanium, Antimon, Tellur, Thallium und Indium. In manchen Lagerstätten aber, vor allem an Inselbogenvulkanen, können diese Elemente stärker konzentriert sein.

Welche Metalle in welchen Konzentrationen in den Massivsulfiden abgelagert werden, hängt insbesondere von der Zusammensetzung des Gesteins unter den Hydrothermalquellen und von der Temperatur des austretenden Wassers ab. So schwanken die Gehalte nicht nur von Region zu Region, sondern sogar innerhalb eines Massivsulfidvorkommens oder eines einzelnen Schwarzen Rauchers. Das liegt daran, dass die Temperatur mit zunehmender Entfernung von der Hydrothermalquelle sinkt. Mineralien, die reich an Kupfer sind, bilden sich oftmals im Kern der Raucher. In der Außenzone der porösen Raucher wird das heiße Fluid mit dem kalten Meerwasser vermischt, und es setzen sich Mineralien mit anderen Metallen ab – beispielsweise Pyrit, Sphalerit oder Markasit, die

2.30 > Massivsulfide zeichnen sich vor allem durch hohe Gold- und Silbergehalte aus, die die der Manganknollen und Kobaltkrusten zum Teil deutlich übersteigen. Doch längst nicht jedes Massivsulfidvorkommen ist reich an Edelmetallen. Schon innerhalb einer Region, wie etwa im Manus-Becken bei Papua-Neuguinea, finden sich Massivsulfidvorkommen mit sehr unterschiedlichen Gold- und Silbergehalten.

2.31 > An Schwarzen Rauchern tritt Wasser mit Temperaturen von bis zu 380 Grad Celsius aus. Es enthält Sulfide, eine bestimmte Art von Schwefelverbindungen, die das Wasser dunkel färben.



reich an Eisen und Zink sind. Diese Zonierung liegt auch im größeren Maßstab vor: Am Rand der Massivsulfidvorkommen finden sich Raucher mit geringeren Austrittstemperaturen, aus denen wiederum andere Mineralien freigesetzt werden. Da bei Expeditionen in der Vergangenheit häufig nur an den Kaminen selbst Massivsulfidproben genommen wurden, ist bisher kaum bekannt, wie die Metalle innerhalb eines Vorkommens verteilt sind. Die Zusammensetzung der Massivsulfide ändert sich aber nicht nur mit der Entfernung von der heißen Quelle, sondern auch mit der Tiefe, und es gibt dazu bisher nur wenige Daten. Denn längst nicht auf jeder Expedition und auf jedem Forschungsschiff stehen spezielle Bohrgeräte für die Probennahme zur Verfügung. Um einschätzen zu können, wie lohnend ein Vorkommen und wie hoch der Metallgehalt ist, sind künftig viele weitere Bohrungen nötig.

Startschuss in der Südsee?

Wie die Kobaltkrustenvorkommen liegen bedeutende Massivsulfidvorkommen nicht nur in den internationalen Gewässern der Hohen See, sondern in den Ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) verschiedener Inselstaaten. Über einen zukünftigen Abbau wird dort also nicht die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) befinden, sondern die jeweilige lokale Regierung.

Sehr weit fortgeschritten sind die Pläne für einen Abbau in der Bismarcksee vor Papua-Neuguinea. Die Regierung dort kooperiert mit einem kanadischen Unternehmen, an dem wiederum große Rohstoffkonzerne aus Kanada, Russland und Südafrika beteiligt sind. Wegen eines Schiedsverfahrens über die Zahlung von Projektkosten lagen die Pläne zwischenzeitlich auf Eis. Erst im Oktober 2013 konnte ein Schlichter eine Einigung herbeiführen. Derzeit sieht es so aus, dass im Frühjahr 2014 einer Werft der Zuschlag für den Bau eines Spezialschiffs für den Massivsulfidabbau erteilt werden soll. Die Raupenfahrzeuge für die Arbeit am Meeresboden werden bereits gebaut. Künftig sollen 3 bis 300 Tonnen schwere Fahrzeuge zum Einsatz kommen: eine große und eine kleine Gesteinsfräse sowie ein Sammelgerät, das die abgetragenen Massivsulfidbrocken aufnimmt. Wie der Hersteller



betont, sind die technischen Herausforderungen durchaus zu meistern. So produziert das Unternehmen bereits seit vielen Jahren schwere Raupenfahrzeuge, sogenannte Grabenfräsen, für die Verlegung von Unterwasserkabeln, die zum Teil in noch tieferem Wasser eingesetzt werden. Das Gestein soll künftig vom Sammelgerät zu einem großen Behälter gepumpt werden, der zwischen Meeresboden und Schiff auf- und absteigt. Der Behälter soll am Meeresboden mit Massivsulfidbrocken befüllt, dann zum Schiff gezogen, geleert und anschließend wieder zum Meeresboden abgesenkt werden. Die Kooperationspartner gehen davon aus, dass der Abbau etwa 2016 beginnen könnte.

Wenige Explorationslizenzen

In den internationalen Gewässern ist man noch nicht ganz so weit, da die Exploration und der Abbau dort zentral über die ISA geregelt und koordiniert werden. Explorationslizenzen wurden für Gebiete im Indischen Ozean bereits an China und Südkorea vergeben, für Gebiete am Mittelatlantischen Rücken an Frankreich und Russland. Andere Staaten haben erst kürzlich Explorationslizenzen beantragt oder stehen, wie beispielsweise Deutschland in Bezug auf den Indischen Ozean, kurz davor. Über diese Anträge muss die ISA zunächst noch befinden. Insgesamt deutet sich für die Massivsulfidvorkommen aber an, was künftig auch für den Abbau von Kobaltkrusten und Man-

2.32 > Vor Papua-Neuguinea soll der Abbau von Massivsulfiden 2016 beginnen. Das schwere Chassis der Gesteinsfräse, die dort am Meeresboden arbeiten soll, ist bereits fertig.

ganknollen gelten dürfte: Während der Abbau in internationalen Gewässern noch einige Jahre auf sich warten lassen wird, könnten einzelne Staaten in Kooperation mit Bergbau- oder Rohstoffkonzernen vorpreschen und in der eigenen AWZ mit dem Abbau beginnen. Für Papua-Neuguinea etwa ist der Abbau interessant, weil die Massivsulfidvorkommen vor der eigenen Küste hohe Gold- und Silbergehalte aufweisen.

Extremer Lebensraum, viele Spezialisten

Hydrothermalquellen sind nicht nur Rohstofflieferant, sondern auch ein außergewöhnlicher Lebensraum. Trotz lebensfeindlicher Konditionen wie Temperaturen von mehr als 350 Grad Celsius und das mit giftigen Metallverbindungen angereicherte, leicht saure Hydrothermalwasser hat sich hier im Laufe von Jahrtausenden eine einzigartige Artengemeinschaft entwickelt, die perfekt an die harten Bedingungen angepasst ist.

Für gewöhnlich ist die Sonne die Energiequelle für das Leben im Meer. Sie lässt Algen gedeihen, die das Sonnenlicht mithilfe der Photosynthese nutzen, um energiereiche Moleküle wie etwa Zucker aufzubauen. Diese sogenannte **Primärproduktion** ist die Basis der Nahrungsnetze im Meer.

An den Hydrothermalquellen aber ist es dunkel. Die Primärproduktion wird hier von **chemoautotrophen** Bakterien geleistet, die die energiereichen chemischen Verbindungen der Hydrothermalquellen verwerten und in Moleküle umwandeln, die auch andere Organismen nutzen können. Die Bakterien ertragen Wassertemperaturen von mehr als 100 Grad Celsius und kommen daher in der Nähe der Raucher vor. Von den Bakterien oder ihren Stoffwechselprodukten ernähren sich höhere Organismen wie etwa Muscheln – und von diesen wiederum andere Lebewesen. So sind an den Quellen Gemeinschaften mit bis zu 600 verschiedenen Arten zu finden, darunter beispielsweise Schnecken der Gattung *Alviniconcha*, die Temperaturen von bis zu 45 Grad Celsius tolerieren. Viele dieser Tiergruppen leben ausschließlich an Hydrothermalquellen. Dank der ständigen Nährstoffzufuhr kommen die Organismen in großer Zahl vor. Bei Expeditionen hat man mitunter auf 1 Quadratmeter Hunderte bis Tausende Tiere entdeckt.

Was ist selten?

Ob es an den Hydrothermalquellen der Tiefsee endemische Arten gibt, die nur in einem eng begrenzten Gebiet vorkommen oder im Extremfall nur auf einem einzigen Massivsulfidvorkommen leben, ist beim Abbau eine entscheidende Frage. Denn diese könnten dadurch aussterben. Biologen versuchen daher zu klären, wie weit verbreitet bestimmte Arten sind, ob sie in einem größeren Meeresgebiet wie etwa dem Indischen Ozean an mehreren Hydrothermalquellen zu finden oder auf eine Region wie etwa die Bismarcksee beschränkt sind.

Tatsächlich haben Wissenschaftler Unterschiede zwischen verschiedenen Meeresregionen festgestellt. Große Röhrenwürmer etwa dominieren die Gebiete im Ostpazifik, wurden aber niemals im Atlantik, im Indischen Ozean oder im Südwestpazifik entdeckt. Auf dem Mittelatlantischen Rücken hingegen kommen in großer Zahl Tiefseegarnelen vor, auf deren Körper **symbiotische** chemoautotrophe Bakterien leben, die sie mit Nährstoffen versorgen. Im Indischen Ozean schließlich findet man sowohl viele Tiefseegarnelen als auch Anemonen und Schnecken mit symbiotischen Bakterien.

Aufgrund der unterschiedlichen Funde hat man daher versucht, Hydrothermalquellen anhand der Ähnlichkeit ihrer Lebensgemeinschaften und der geologischen Strukturen in biogeografische Provinzen einzuteilen. Die Forscher haben zu diesem Zweck die Daten von Expeditionen ausgewertet und Einzelnachweise von Lebewesen aus 63 Hydrothermalquellen mithilfe statistischer Verfahren abgeglichen.

Nach Maßgabe dieser Analyse gibt es 6 verschiedene Provinzen, in denen zu großen Teilen unterschiedliche Arten vorkommen. Die Provinzen sind: der Nordwestpazifik, der Südwestpazifik, der Nordostpazifik, der nördliche Teil des Ostpazifischen Rückens, der südliche Teil des Ostpazifischen Rückens und der Mittelatlantische Rücken.

Natürlich kommen in den verschiedenen Gebieten zu einem gewissen Teil auch verwandte oder gleiche Arten vor. Die Forscher haben deshalb versucht nachzuvollziehen, ob und wie sich Arten im Laufe der Jahrtausende von einer zur anderen Provinz haben ausbreiten können. Eine zentrale Rolle scheint dabei der Ostpazifische Rücken als

Metallschlamm im Roten Meer

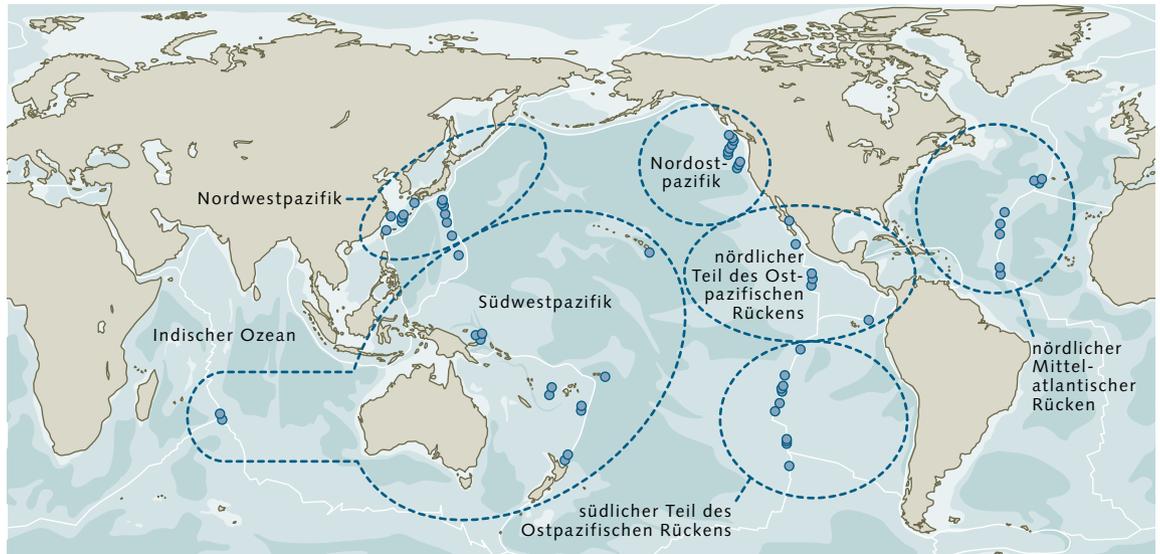
Eine besondere Form von Sulfidablagerungen sind die sulfidreichen Sedimente am Grund des Roten Meeres. Hier liegen die Sulfide nicht in fester Form, sondern als dickflüssiger, metallhaltiger Schlamm vor. Auch im Roten Meer ist die Ursache für die Sulfidbildung magmatische Aktivität im Untergrund. So ist das Rote Meer dadurch entstanden, dass sich hier die Afrikanische und die Arabische Platte voneinander entfernen. In jedem Jahr driften die Platten etwa 1 Zentimeter auseinander, sodass das Rote Meer langsam wächst. Die Bruchstelle der Platten verläuft ziemlich genau in der Mitte des Roten Meeres von Nordwest nach Südost. An manchen Stellen dieser Bruchzone gibt es Vertiefungen, Becken, an deren Grund sich die Schlämme bilden. In diesen Becken liegt – wie die Dunstglocke über einem Tal – eine 200 Meter mächtige Schicht von extrem salzigem, schwerem Wasser. Dieses mehr als 60 Grad Celsius warme Wasser stammt aus salzreichen Gesteinsschichten an den Flanken des Roten Meeres und hat sich hier angereichert. Mit einem Salzgehalt von rund 26 Prozent ist es rund 7-mal salziger als herkömmliches Meerwasser. Damit ist es so schwer, dass es in die

Vertiefungen läuft. Die mit Sulfiden angereicherten hydrothermalen Lösungen, die aus der Tiefe aufsteigen, vermischen sich mit dem warmen salzhaltigen Wasser. Dabei verbinden sich die im Wasser gelösten Metalle zu Sulfidpartikeln. Die Partikel sinken zum Boden und bilden die metallreichen Schlämme. Das größte Sulfid-schlammvorkommen im Roten Meer befindet sich im Atlantis-II-Tief, einem rund 2000 Meter tiefen Becken von der Größe Manhattans, das zwischen Saudi-Arabien und dem Sudan liegt. Dieses Sulfidvorkommen gilt als das größte weltweit, die Massivsulfidvorkommen mit eingeschlossen. Das Gebiet wurde bereits in den 1970er Jahren intensiv erkundet, und es wurden hier wertvolle Metalle wie Zink, Kupfer, Silber und Gold gefunden. Ein deutsches Industriekonsortium führte damals in Zusammenarbeit mit der Red Sea Commission, einer Kooperation von Saudi-Arabien und dem Sudan, über 490 Erkundungsbohrungen im schlammigen Boden durch. Damit gehört das Areal zu den weltweit am besten untersuchten Sulfidvorkommen. Darüber hinaus gelang es, 1979 rund 15 000 Kubikmeter Schlamm mit einer prototypischen Sauganlage an die Wasseroberfläche zu fördern. Wie andere Meeresbergbauvorhaben wurde diese Kooperation aber Anfang der 1980er Jahre eingestellt, weil es auf dem Weltmarkt ausreichend Rohstoffe aus Landlagerstätten gab. Zwischenzeitlich war aufgrund hoher Metallpreise am Weltmarkt das Interesse an den Schlämmen erneut erwacht. 2010 erhielt ein saudi-arabisch-kanadisches Konsortium eine Förderlizenz für 30 Jahre. Das Gebiet wurde erneut in Kooperation mit deutschen Forschern erkundet. Konkrete Pläne für einen Beginn des Meeresbergbaus aber gibt es bis heute nicht, was auch daran liegt, dass die Metallpreise in letzter Zeit wieder gesunken sind. Insgesamt, schätzt man, enthält das Atlantis-II-Becken eine Schlammmenge mit einem Trockengewicht von rund 89,5 Millionen Tonnen, was verglichen mit den anderen Massivsulfidvorkommen am Meeresboden sehr viel ist. Allerdings sind die Metallgehalte in den Sedimenten geringer als beispielsweise in den Massivsulfiden der Bismarcksee. Nach derzeitigen Schätzungen befinden sich im Schlamm des Atlantis-II-Beckens gut 3 Millionen Tonnen Zink, 740 000 Tonnen Kupfer, 6500 Tonnen Silber und 46 Tonnen Gold. Verglichen mit den globalen Reserven dieser Metalle, liegen diese Werte im einstelligen Prozent- oder gar im Promillebereich. Für den Sudan oder Saudi-Arabien, die sonst kaum über nennenswerte Metallreserven verfügen, könnte der Abbau bei entsprechenden Metallpreisen jedoch künftig interessant sein. Allerdings müssen Förderanlagen für den Alltagseinsatz erst noch entwickelt werden. Problem dabei ist, dass das warme salzige Wasser besonders aggressiv ist und die Fördergeräte angreifen könnte.



2.33 > Das Atlantis-II-Tief liegt mitten im Roten Meer. An seinem Grund gibt es metallreiche Sulfidschlämme.

2.34 > In den verschiedenen Meeresgebieten weltweit dominieren jeweils andere Tierarten den Lebensraum der Hydrothermalquellen. Durch eine statistische Analyse der Fauna an 63 Hydrothermalquellen konnten Forscher 6 biogeografische Provinzen identifizieren, deren Artenzusammensetzungen sich deutlich unterscheiden.



eine Art Drehscheibe der Artenverbreitung zu spielen. Es bleibt aber auch hier zu bedenken, dass durch moderne genetische Untersuchungen immer mehr Unterschiede zwischen ähnlichen Arten gefunden werden und in vielen Vorkommen solche genetischen Untersuchungen noch nicht durchgeführt wurden. Offen ist bis heute, ob vermeintlich gleiche Arten auch wirklich identisch sind.

Neben den Arten, die in besonderer Weise an die heißen Quellen angepasst sind, sind vor allem auch diejenigen bedroht, die an Massivsulfiden erkalteter Hydrothermalquellen vorkommen. Beispielsweise kolonisieren Tiefseekorallen, Schwämme und Seepocken diesen Lebensraum. Für sie gilt das Gleiche wie für viele andere Tiefseeorganismen: Sie sind selten, wachsen extrem langsam und produzieren nur wenige Nachkommen. Und deshalb sind sie auch besonders gefährdet. Sterben die Elterntiere, gibt es kaum noch Nachwuchs, durch den sich der Bestand erholen könnte.

Generell ist bis heute sehr wenig über die Biologie der Tiefseetiere bekannt. Um zu verstehen, ob und wie sich Tiergemeinschaften nach einer Störung, zum Beispiel einem Abbau von Massivsulfiden, erholen, müssen noch offene Fragen geklärt werden. So ist unter anderem unklar, wie zahlreich oder selten die Arten sind, in welchem Lebensraum sie leben, wie weit diese Lebensräume voneinander entfernt sind und wie beziehungsweise ob sich die Tiere vom einen zum anderen Lebensraum ver-

breiten können. Nur dann wäre eine Wiederbesiedlung abgeernteter Areale überhaupt möglich.

Bevor der Bergbau beginnt ...

Um die Schäden, die durch den Abbau von Massivsulfiden entstehen könnten, so klein wie möglich zu halten, schlagen Fachleute vor, zuvor mit weiteren Studien zu untersuchen, inwieweit endemische Arten betroffen sein könnten. Dabei muss man zwischen Massivsulfiden an aktiven Hydrothermalquellen und alten Massivsulfiden an versiegten Quellen unterscheiden. Aufgrund der extremen Spezialisierung ist bei den Bewohnern der Hydrothermalquellen eher davon auszugehen, dass diese in eng begrenzten Meeresgebieten auftreten und endemisch sind. Was die gewöhnlichen Tiefseearten betrifft, liegt nahe, dass diese weiter verbreitet sind. Wegen ihres langsamen Wachstums und der geringen Zahl an Nachkommen aber muss man besonders darauf achten, dass man vor Ort nicht ganze Bestände ausrottet. Beiden Artengruppen wäre vermutlich geholfen, wenn man die Vorkommen nur teilweise aberntete, um Flächen zu erhalten, von denen aus solche abgeernteten Gebiete wiederbesiedelt werden können. Oder aber Massivsulfide nur dort zu fördern, wo bekannt ist, dass in der unmittelbaren Umgebung weitere Hydrothermalefelder existieren, die die gleiche Artenzusammensetzung aufweisen.

Der Meeresbergbau – kein Goldrausch, aber eine Option

Der Mensch fördert schon seit Jahrzehnten mineralische Rohstoffe aus dem Meer, dazu zählen Diamanten vor Namibia oder Sand aus den Küstenbereichen Europas, mit dem Strände aufgespült werden. Allein in Europa werden jedes Jahr rund 93 Millionen Tonnen Sand aus dem Meer entnommen, was dem Rauminhalt von 37 Cheops-Pyramiden entspricht.

Staatsregierungen und Industriekonzerne planen, in den kommenden Jahrzehnten noch deutlich mehr aus der Tiefsee zu fördern, nämlich Hunderte Millionen Tonnen metallhaltiger Mineralien, die am Meeresboden in 3 Formen vorliegen: erstens als kartoffelgroße Manganknollen, zweitens als harte Überzüge an den Flanken von Unterwasservulkanen, sogenannte Kobaltkrusten, und drittens als massive Ablagerungen, die sich an heißen mineralienreichen Tiefseequellen gebildet haben, als Massivsulfide.

Interessant sind diese Rohstoffvorkommen, weil sie große Mengen von wirtschaftlich interessanten Metallen aufweisen, die die bekannten Mengen in den Lagerstätten an Land zum Teil deutlich übertreffen. Allein die Manganknollen im pazifischen Manganknollengebiet der Clarion-Clipperton-Zone enthalten rund 5 Milliarden Tonnen Mangan, etwa 10-mal mehr als die heute wirtschaftlich abbaubaren Lagerstätten an Land. Viele der marinen Metallvorkommen sind seit den 1970er Jahren bekannt. Schon damals förderte man in Pilotprojekten Manganknollen aus dem Pazifik. Weil es an Land genügend Rohstoffe gab und die Metallpreise relativ niedrig waren, blieb der Meeresbergbau lange unattraktiv. Im vergangenen Jahrzehnt aber ließ vor allem der wachsende Bedarf der Schwellenländer, allen voran China, die Preise stark steigen.

Der Meeresbergbau ist aus verschiedenen Gründen interessant. Zum einen steigt durch neue Hightech-Anwendungen wie etwa in Smartphones die

Nachfrage nach chemischen Elementen, die in den marinen Vorkommen enthalten sind. Zum anderen werden viele dieser Elemente nur in wenigen Ländern abgebaut. Vor allem China hat eine marktbeherrschende Position. Viele Staaten möchten sich daher eigene Claims am Meeresboden sichern.

Problematisch ist, dass durch den Meeresbergbau viele Hundert Quadratkilometer Meeresboden beeinträchtigt würden. Meeresbiologen fürchten, dass dadurch Tiefseelebensräume zerstört werden. Um einen Goldrausch im Ozean zu verhindern, wurde 1994 die Internationale Meeresbodenbehörde in Jamaika gegründet. Sie vergibt Lizenzgebiete in internationalen Gewässern an interessierte Staaten und wacht darüber, dass auch Entwicklungsländer an den Gewinnen beteiligt werden. Zudem hat die Behörde Regelungen für den Schutz der Tiefseelebensräume ausgehandelt. So dürfen die Lizenzgebiete nicht komplett abgebaut werden. Manche Bereiche sollen unangetastet bleiben, von denen aus abgebaute Gebiete wiederbesiedelt werden können.

Ob und wie stark sich der Meeresbergbau entwickelt, ist noch offen. Zum einen gibt es noch keine Abbaugeräte, zum anderen sind die Metallpreise nach zwischenzeitig extremen Anstiegen teilweise wieder gesunken, sodass der Tiefseebergbau zurzeit weniger wirtschaftlich zu sein scheint. Dennoch gelten manche 200-Seemeilenzonen, für die wiederum die Meeresbodenbehörde nicht zuständig ist, als vielversprechend. In diesem Bereich entscheiden die Küstenstaaten allein, wann und mit welchen Umwelt- und Sicherheitsstandards Metalle abgebaut werden. Interessant sind die 200-Seemeilenzonen von Papua-Neuguinea, in der Massivsulfide mit hohen Gold- und Silbergehalten zu finden sind, sowie der Cookinseln, in der kobaltreiche Manganknollen liegen. Ein Abbau der edelmetallhaltigen Vorkommen in Papua-Neuguinea erscheint heute schon wirtschaftlich. Ein Industriekonsortium will Ende 2016 mit dem Abbau beginnen.

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:

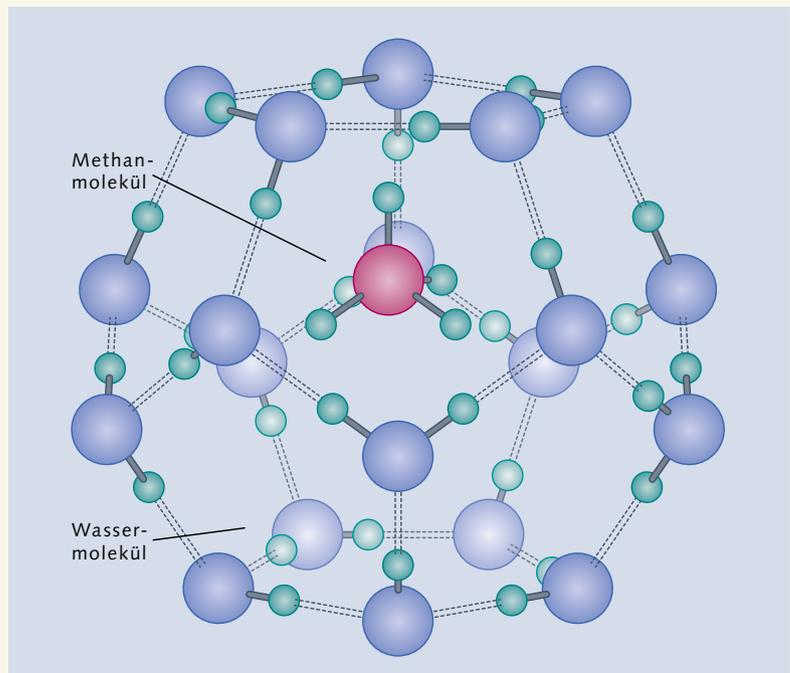
- Biogenes Methan entsteht im Meeresboden durch den mikrobiellen Abbau von Biomasse. Bei dieser Biomasse handelt es sich um abgestorbene Planktonorganismen wie zum Beispiel Mikroalgen oder Kleinkrebse, die in der Wassersäule zum Meeresboden sinken und sich im Laufe der Zeit zu mächtigen Sedimentpaketen 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

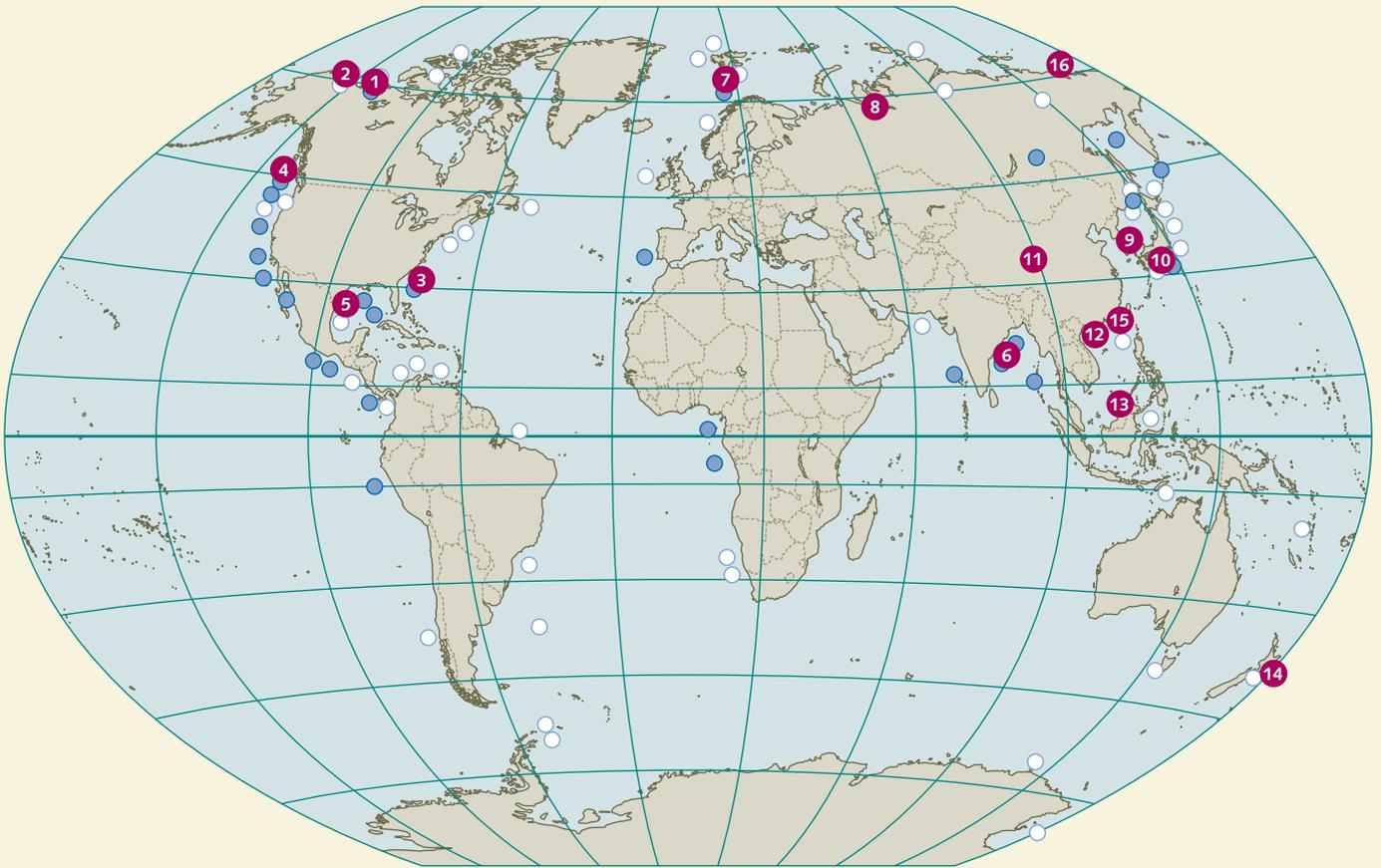
Methanhydrat bildet sich bei Temperaturen von unter 10 Grad Celsius und hohen Drücken von mehr als 30 bar, dem 30-Fachen des Atmosphärendrucks, aus Wasser und Methangas. Das Methan wird dabei von Wassermolekülen umschlossen und in eine Art Molekülkäfig gesperrt. Chemiker nennen derartige Molekülstrukturen 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. Welt-

weit 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 Südküste 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.

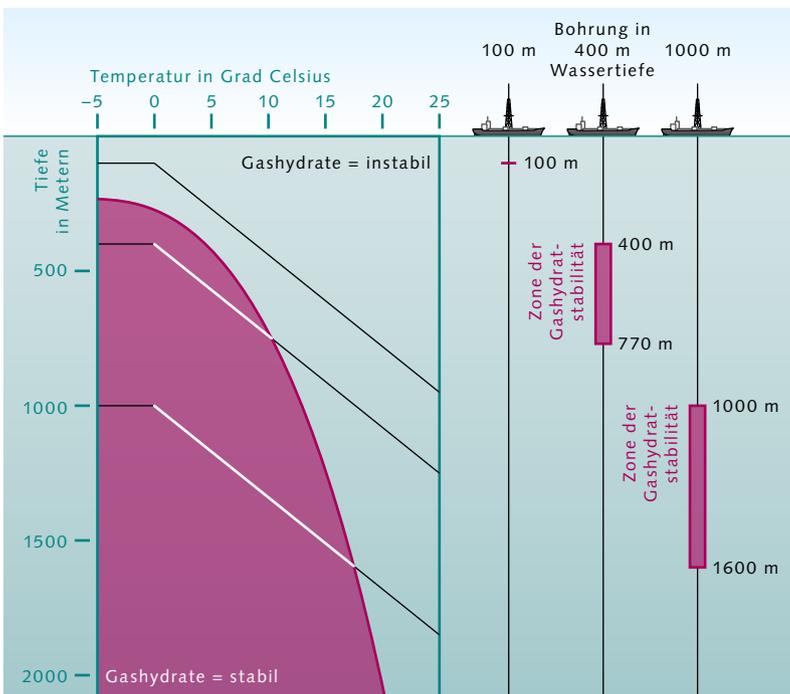
Methanogenese erzeugt wurde. Die methanogenen Bakterien sind in einer Sedimenttiefe von etwa 10 Metern bis 3 Kilometern zu finden. Oberhalb von 10 Metern sind andere Mikroorganismen aktiv, die kein Methan erzeugen. Direkt auf dem Meeresboden und in den oberen Zentimetern des Sediments leben Mikroorganismen, 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.

- 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



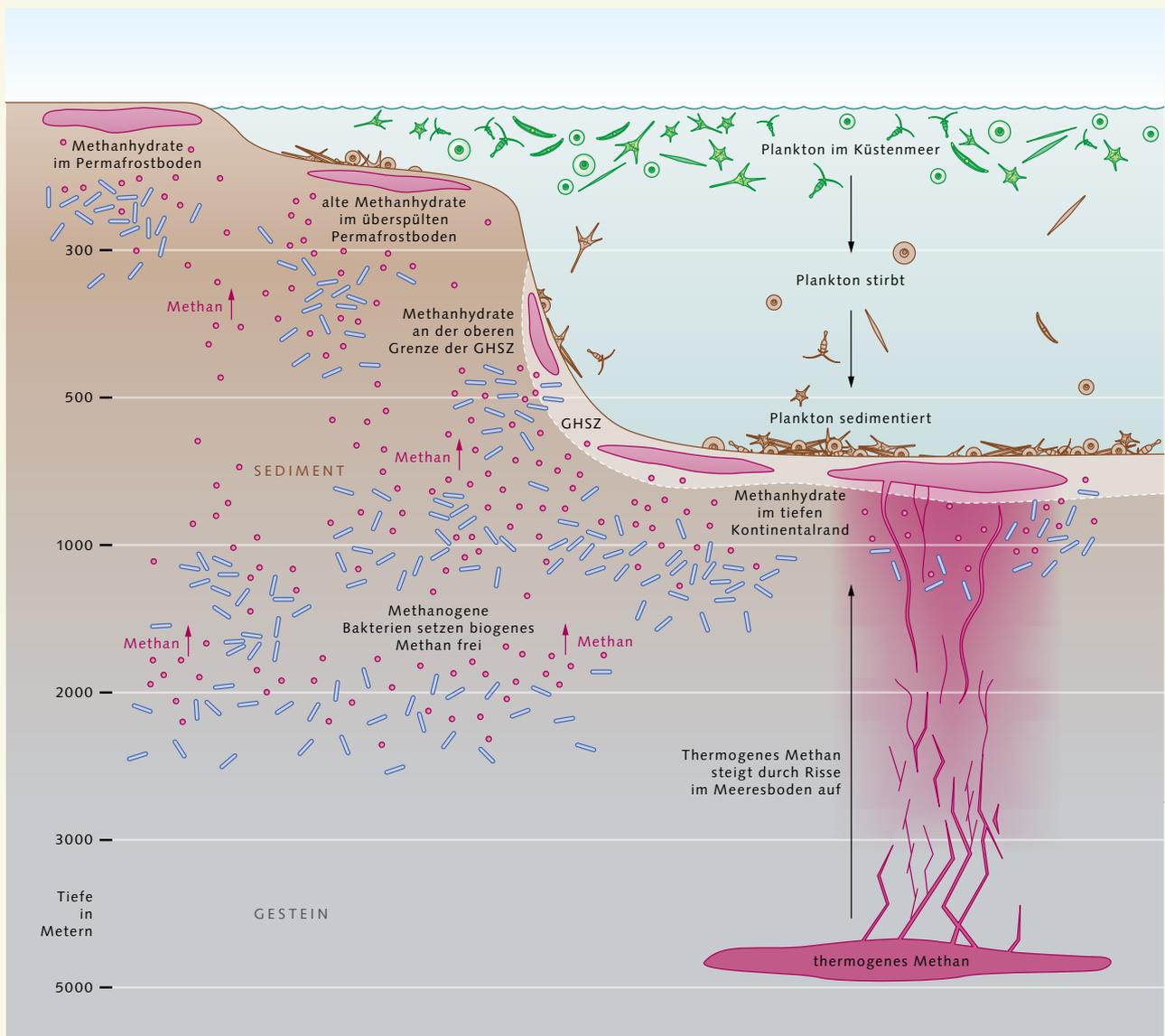
3.3 > Gashydrate kommen dort vor, wo viel Biomasse zu Boden sinkt und zugleich niedrige Temperaturen und hohe Drücke herrschen – insbesondere an den Kontinentalabhängen. Je höher die Wassertemperatur ist, desto größere Tiefen und Drücke sind für die Bildung des Hydrats nötig. In sehr großer Tiefe jedoch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

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

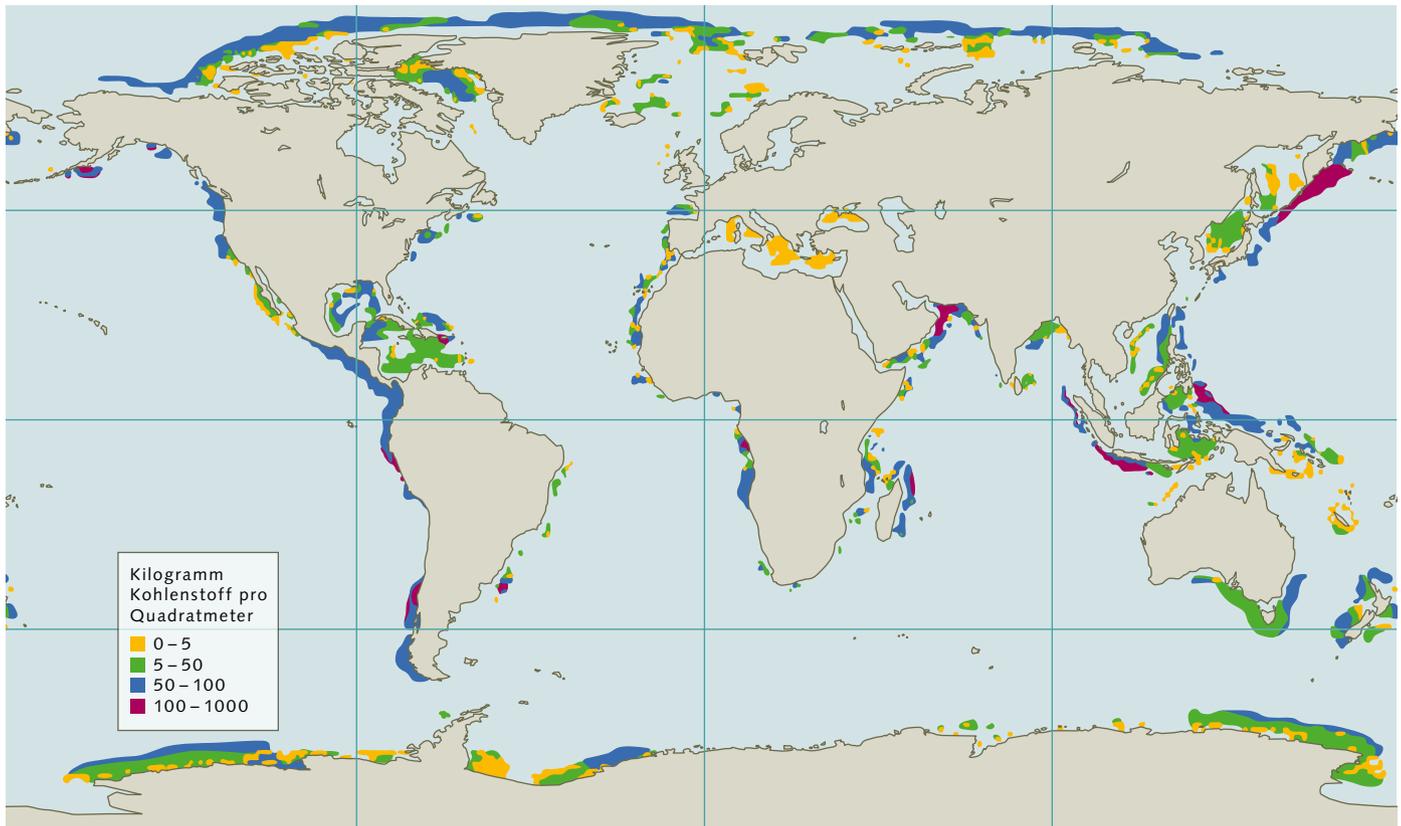
Bislang wurden erst wenige Methanhydratvorkommen im Meer im Detail untersucht. Dennoch hat man versucht, die weltweit verfügbare Menge an Methanhydraten zu berechnen, und kam dabei zu Schätzungen von 500 bis 55 000 Gigatonnen Kohlenstoff. 1 Gigatonne entspricht 1 Milliarde Tonnen. Kohlenstoff macht 75 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 abweichen, 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 Jahrtausende 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:

- 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.

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



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 Gesamtschätzung 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.

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 Methan 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.

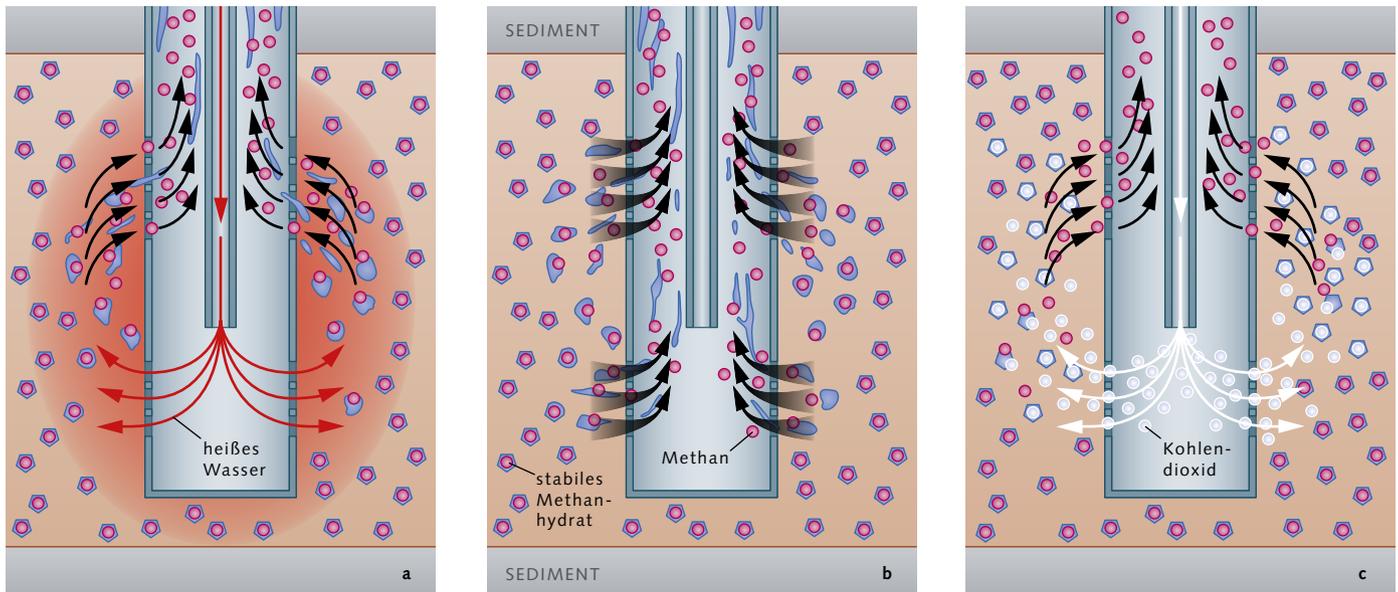
DRUCKENTLASTUNG: In den Methanhydratlagerstätten herrschen hohe Drücke, weil auf ihnen Wasser und Sedimente lasten. Bohrt man die Lagerstätten von oben an, verringert sich der Druck wie in einem Fahrradschlauch bei einem Loch. Durch diese Druckentlastung zerfällt das Hydrat langsam. Das Methan wird frei.

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

Importländer	bcm
Japan	116
Italien	70
Deutschland	68
USA	55
Korea	47
Türkei	43
Frankreich	41
Großbritannien	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.



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-

3.8 > 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.

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 CO₂ 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 unbekanntem 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 Berechnung unter anderem, wie stark sich in den verschiedenen Meeresgebieten im Laufe von Jahrtausenden 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 hohem Druck, verflüssigt es sich für gewöhnlich. Erhöht man den Druck und zugleich die Temperatur, erreicht das Gas hingegen eine Art Zweiterzustand 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 überkritisches Fluid. Dieses überkritische Fluid ist besonders reaktionsfreudig. Überkritisches CO₂ 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 erreichen 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 Bohrinnseln 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.

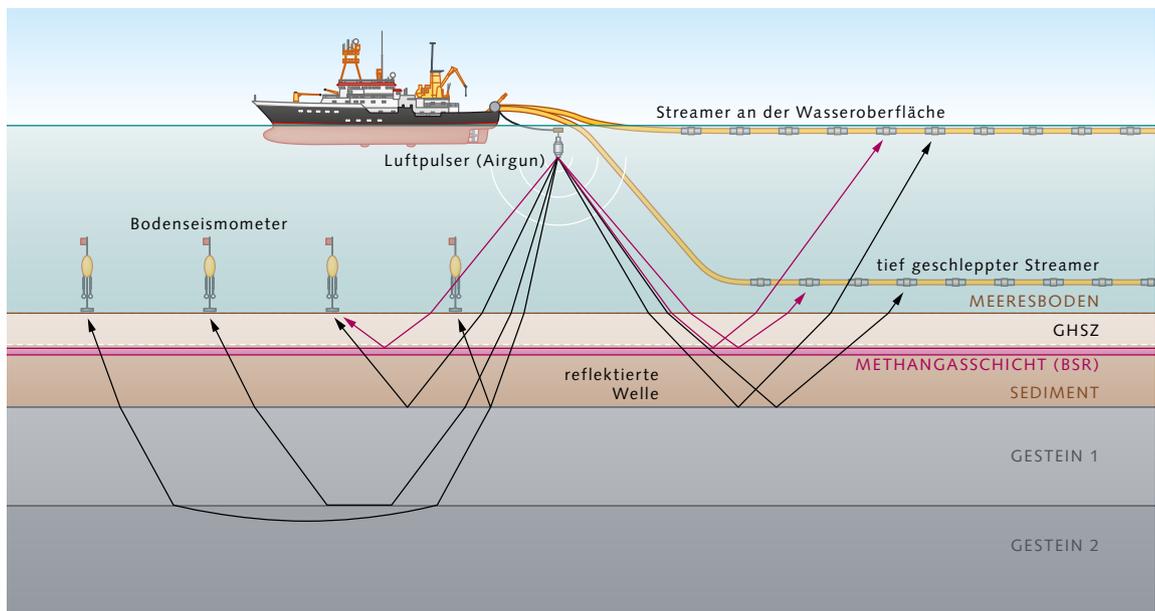
MEHRKANALSEISMIK: Bei seismischen Verfahren werden mit Airguns (Luftpulser) akustische Wellen erzeugt, die in den Meeresboden eindringen und dort von verschiedenen Schichten unterschiedlich stark reflektiert oder gebrochen werden. Empfänger, die an einem hinter dem Schiff hergezogenen, häufig mehrere Kilometer langen Messkabel montiert sind, sogenannte Streamer, nehmen die reflektierten Wellen auf. Die Daten aller Empfänger (Kanäle) werden dann zu einem Abbild des Mee-



resbodens 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 Bohrkern entnommen. Diese langen Bohrkern

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 Beobachtungreichweiten 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?

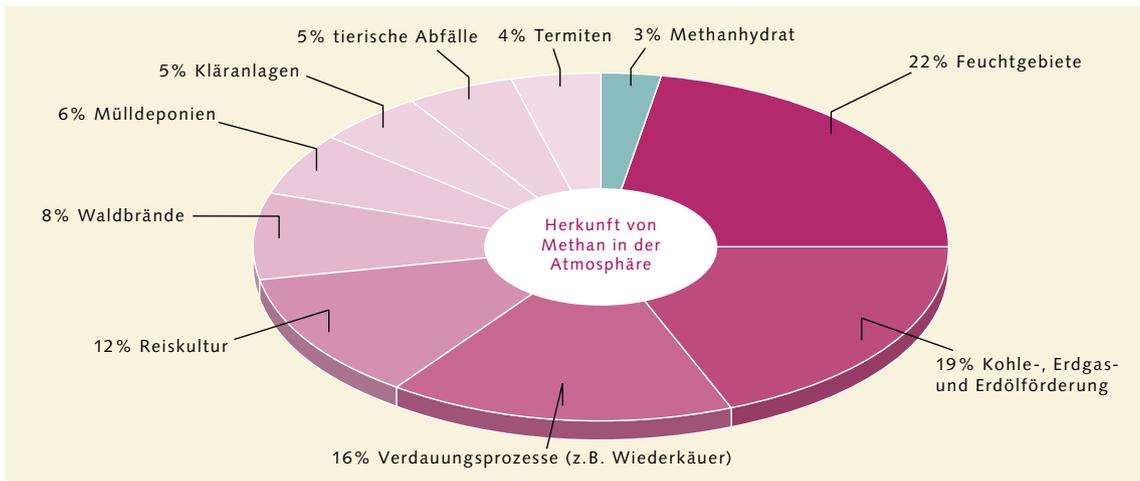
Dass Hänge rutschen, ist nicht ungewöhnlich. Es gibt sogar wissenschaftliche Beweise dafür, dass durch Hangrutschungen große Tsunamis ausgelöst wurden. Ein Beispiel ist die Storegga-Rutschung vor Norwegen, bei der vor 7000 Jahren ein großer Teil des norwegischen Kontinentalabhanges in die Tiefe glitt. 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.

Punktueller 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 (CO₂), 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 Meereseerwärmung 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

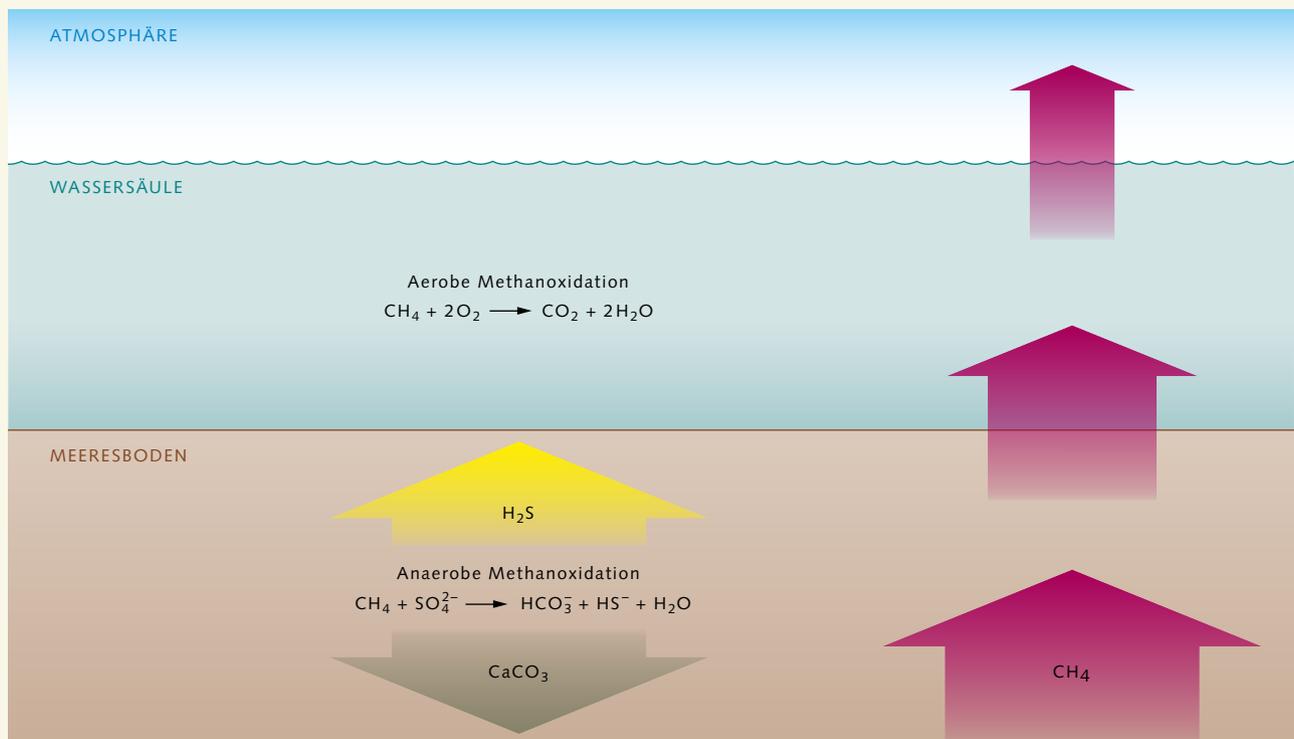
Methan, das aus den Sedimenten aufsteigt, wird zu einem großen Teil von Mikroorganismen aufgezehrt, die in den oberen Schichten des Meeresbodens und im Wasser leben. Im Meeresboden sind Bakterien aktiv, die ohne Sauerstoff, anaerob, leben. Die anaeroben Bakterien verarbeiten das Methan mithilfe von Sulfat (SO_4^{2-}). Dabei entstehen Hydrogensulfidionen (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.

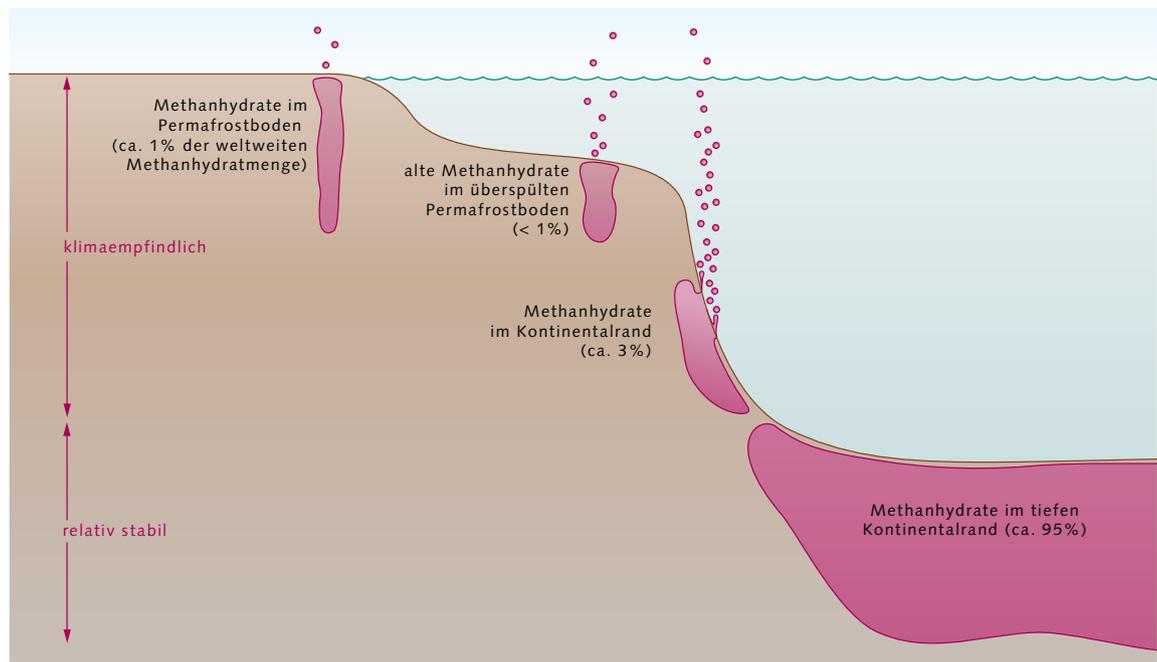
Das kann problematisch sein, weil viele Meereslebewesen in sauerstoffarmen Zonen nicht überleben können. Zum anderen bildet das entstehende CO_2 im Wasser Kohlensäure, was zu einer Versauerung des Meerwassers führt.

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 Bohrinselform 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, CO₂-Emissionen zu einer lang anhaltenden Erwärmung führen, da das vom Menschen freigesetzte CO₂ 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 CO₂-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.

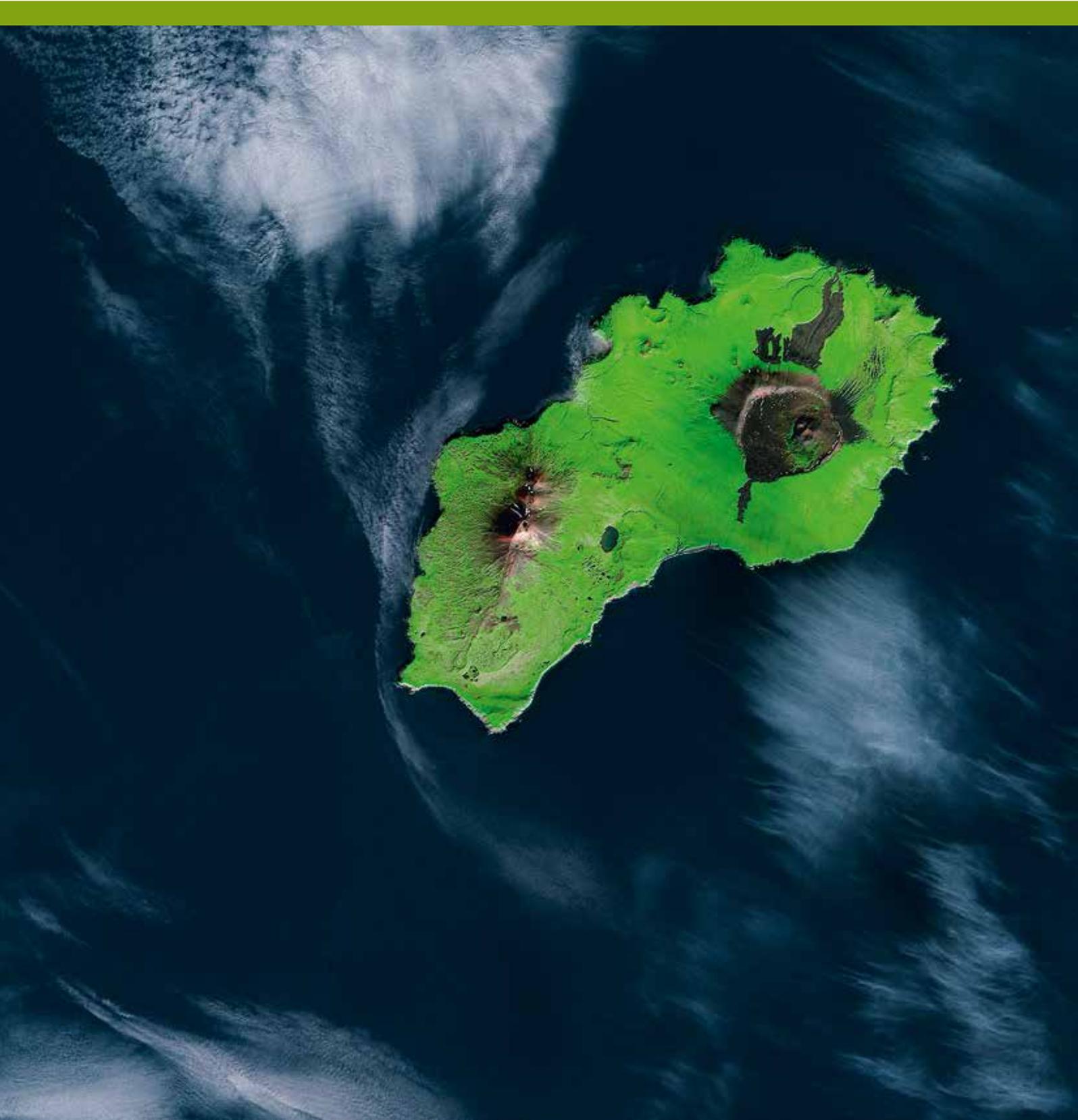
Befürchtet wurde außerdem, dass durch das Bohren am Meeresboden Methan in großen Mengen unkontrolliert ins Wasser und schließlich in die Atmosphäre aufsteigen könnte. Da Methan ein starkes Treibhausgas ist, würde das die Erderwärmung verstärken. Wissenschaftler gehen davon aus, dass das nicht geschehen 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.

4 Umweltschonende Förderung und gerechte Verteilung



> Damit der Meeresbergbau nicht in einen Wettlauf um die vielversprechendsten Claims ausartet, verwaltet eine UN-Behörde die Bodenschätze in internationalen Gewässern. Sie garantiert, dass die Umwelt geschützt wird und auch die Entwicklungsländer am Reichtum teilhaben. Industrielle Tätigkeiten im Meeresgebiet der Küstenstaaten hingegen werden durch nationale Gesetze geregelt. Wie die Offshore-Ölförderung zeigt, wird die Umwelt dadurch nicht immer ausreichend geschützt.



Von der Verantwortung der Staatengemeinschaft

> Der künftige Meeresbergbau in internationalen Gewässern wird durch die Internationale Meeresbodenbehörde geregelt. Sie sorgt dafür, dass die Bodenschätze unter den Ländern der Welt gerecht verteilt und die Lebensräume in der Tiefsee nicht zu stark geschädigt werden. Damit gibt es klare Spielregeln und Umweltschutzstandards, ehe die Ausbeutung von Rohstoffen beginnt. Umweltschützern aber geht der Naturschutz im Meeresbergbau nicht weit genug.

Es besser machen

In dem Maße wie die Menschheit die Gas-, Öl- und Erzvorräte an Land ausbeutet, erhöht sich der Druck auf die Ressourcen im Meer. Hier werden Gas und Öl schon seit Jahrzehnten gewonnen. Längst fördern die Konzerne diese fossilen Rohstoffe auch in tiefem Wasser. Der Abbau von Erzen am Meeresgrund hingegen steht noch aus. Katastrophen wie die Explosion der Bohrinself „Deepwater Horizon“ und etliche Tankerhavarien haben gezeigt, wie gefährlich der Transport und die Förderung von Öl im Meer sein können. An Land wiederum werden durch Berg- und Tagebau sowie die Erdölförderung Regenwälder und Siedlungen zerstört, Erdreiche und Flüsse verschmutzt. Es gilt, Zerstörungen dieses Ausmaßes im Meer künftig zu verhindern und für eine sichere und umweltverträgliche Rohstoffgewinnung im Ozean zu sorgen.

Das größte Regelwerk der Menschheit

Der Schutz des Meeres wird grundsätzlich durch das Seerechtsübereinkommen (SRÜ) geregelt, das von der UN-Seerechtskonferenz 1982 verabschiedet wurde und nach langwierigen Verhandlungen 1994 in Kraft trat. Das SRÜ gilt als Verfassung der Meere. Es ist das größte völkerrechtliche Gesetzeswerk überhaupt und legt die Spielregeln für alle Meeresnutzungen wie Schifffahrt, Fischfang, die Erdgas- und Erdölförderung, den Tiefseebergbau sowie für die Meeresforschung und den Umweltschutz fest. Dem SRÜ sind bis heute 165 Nationen und die EU als Vertragspartner beigetreten. Das SRÜ fordert den Schutz der Meeresumwelt in allgemeinen Formulierungen, die in speziellen Verordnungen für die verschiedenen Nutzungsarten weiter präzisiert werden.

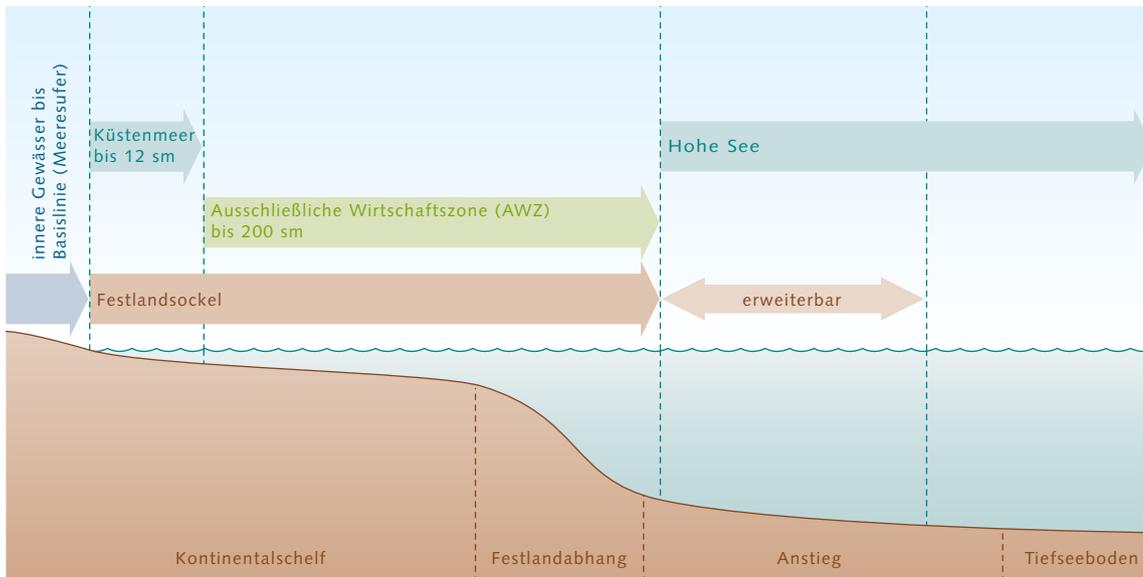
Die Vorschriften des SRÜ gelten für alle Staaten und grundsätzlich in allen Meereszonen, denn die Staaten

haben sich durch Ratifikation diesem Rechtsregime unterworfen. Allerdings ist zu beachten, dass für die Umsetzung des Rechts in verschiedenen Meereszonen jeweils andere Zuständigkeiten gelten. Folgende Meeresgebiete werden unterschieden:

KÜSTENMEER: Das Küstenmeer ist die 12-Seemeilen-Zone. Es gehört zum Hoheitsgebiet eines Staates. Aktivitäten in dieser Zone unterliegen der Gesetzgebung der einzelnen Staaten. Die Gesetzgebung muss aber den international vereinbarten Regeln entsprechen, sofern der Staat das SRÜ ratifiziert hat.

AUSSCHLIESSLICHE WIRTSCHAFTSZONE (AWZ): Diese erstreckt sich vom äußeren Rand des Küstenmeers bis in eine Entfernung von 200 Seemeilen (circa 370 Kilometern) vor der Küste. Die AWZ wird daher auch als 200-Seemeilen-Zone bezeichnet (200-sm-Zone). Zur AWZ zählen der Meeresboden und die Wassersäule. Anders als das Küstenmeer gehört die AWZ nicht zum Hoheitsgebiet eines Staates. Gleichwohl darf allein der Küstenstaat in seiner AWZ Ressourcen wie etwa Erdöl und Erdgas, mineralische Rohstoffe oder auch die Fischbestände ausbeuten. Andere Nationen dürfen die Rohstoffe nur dann nutzen, wenn der Küstenstaat zustimmt. Die Ressourcengewinnung in der AWZ unterliegt der Gesetzgebung des Küstenstaats, welche wiederum den internationalen Regeln des SRÜ entsprechen muss. Für andere Meeresnutzungen, insbesondere die Schifffahrt, gilt die Freiheit der Hohen See auch in der AWZ.

FESTLANDSOCKEL: Als Festlandsockel wird der flach oder steil abfallende Meeresboden vor der Küste bezeichnet, der eine natürliche geologische Verlängerung des Festlands ist. Der Festlandsockel ist wirtschaftlich besonders interessant, weil hier große Mengen an Erdgas und



4.1 > Das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen teilt das Meer in verschiedene Rechtszonen auf. Die Souveränität eines Staates nimmt dabei mit zunehmender Entfernung von der Küste ab. An die Inneren Gewässer schließt sich das Küstenmeer an, das auch 12-Seemeilen-Zone genannt wird. Hier ist die Souveränität des Küstenstaates bereits eingeschränkt, weil es Schiffen aller Länder erlaubt ist, diese Gewässer zu durchfahren. In der sich bis zu 200 Seemeilen

vor der Küste erstreckenden Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) hat ein Küstenstaat das alleinige Recht, lebende und nicht lebende Ressourcen zu explorieren und zu ernten. So darf er Erdöl und Erdgas, mineralische Rohstoffe oder auch Fischbestände ausbeuten. Im Bereich des Festlandsockels, der eine natürliche Verlängerung des Festlands darstellt und über die AWZ hinausreichen kann, darf er lebende und nicht lebende Ressourcen am und im Meeresgrund explorieren und ernten.

Erdöl sowie Gashydrate und Massivsulfide zu finden sind. Der sogenannte innere Festlandsockel ist in seiner Ausdehnung mit der 200-Seemeilen-Zone der AWZ identisch. Mitunter liegt er so tief, dass er zum Tiefseeboden zählt. In vielen Teilen der Welt gibt es jedoch Regionen, wo sich geologisch ein äußerer Festlandsockel nachweisen lässt, der innerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszone beginnt, sich jenseits der 200-Seemeilen-Grenze fortsetzt und somit den Einflussbereich des Küstenstaates erweitert. Solch ein Nachweis muss gegenüber der Festlandsockelgrenzkommission in New York wissenschaftlich geführt und von dieser akzeptiert werden. Der äußere Festlandsockel kann dann bis auf eine Linie von maximal 350 Seemeilen vor der Küste ausgedehnt werden. Alternativ kann ein Staat ein Meeresgebiet bis zu 100 Seemeilen jenseits der 2500-Meter-Tiefenlinie als Erweiterung des Festlandsockels über die Grenzen der AWZ hinaus beanspruchen und in manchen Fällen sogar noch darüber hinaus.

HOHE SEE: An die 200-Seemeilen-Zone schließt sich die Hohe See an, die kein Nationalstaat für sich beanspruchen darf. Sie steht allen Staaten für eine Nutzung offen. Gleichwohl wird die Nutzung der Ressourcen in der Hohen See reguliert. Die Fischerei etwa wird durch Regionale Organisationen für das Fischereimanagement (Regional Fisheries Management Organisations, RFMO) reguliert, die beispielsweise Höchstfangmengen für Fischarten vorgeben. Über die Nutzung und Verteilung der Rohstoffe am Meeresboden hingegen wacht allein die Internationale Meeresbodenbehörde der Vereinten Nationen (International Seabed Authority, ISA). Sie ist für alle mineralischen Ressourcen am Meeresboden zuständig. Diese sind im Seerechtsübereinkommen als gemeinsames Erbe der Menschheit definiert.

Im Hinblick auf die Nutzung der Ressourcen im Meer kann man also vereinfachend zwischen dem internationalen Meeresgebiet und den nationalstaatlichen Bereichen

Tiefsee

Als Tiefsee bezeichnet man den völlig lichtlosen Bereich unterhalb von 800 Metern. Manche Küsten beziehungsweise Festlandsockel fallen so steil ab, dass sie bereits in der AWZ eine Tiefe von 800 Metern und mehr erreichen. Das ist unter anderem vor Japan der Fall.

unterscheiden. Im internationalen Gebiet ist die ISA nicht nur für den Meeresbergbau, sondern theoretisch auch für die Erdgas- und Erdölförderung zuständig. Da Erdgas und Erdöl zum größten Teil in den AWZ vorkommen, ist eine Förderung in internationalen Gewässern heute aber kein Thema.

Die schwere Geburt des Seerechtsübereinkommens

Anders als Erdgas und Erdöl, die vor allem in der AWZ vorkommen, finden sich ergiebige Manganknollen- und zum Teil auch Kobaltkrusten- und Massivsulfidvorkommen im Gebiet der Hohen See. Fachleute bezeichnen den Meeresboden in den internationalen Gewässern meist schlicht mit „The Area“. Lange Zeit stritt die Staatengemeinschaft darüber, wie die Ressourcen am Meeresboden dort aufzuteilen sind. Dies war ein wesentlicher Grund dafür, dass das SRÜ erst 1994, 12 Jahre nach der Verabschiedung durch die UN-Seerechtskonferenz, in Kraft trat. Das Seerechtsübereinkommen war in den 1970er Jahren konzipiert worden – in einer Zeit, die in doppelter Hinsicht durch eine Aufbruchstimmung geprägt war. Zum einen erschien das Meer mit der Entdeckung großer Man-

ganknollenvorkommen im Pazifik als gigantische Rohstoffquelle, die es auszubeuten galt. Zum anderen hatten sich Kolonien von Frankreich, Großbritannien oder Portugal losgesagt und strebten nun nach politischer und wirtschaftlicher Unabhängigkeit. Dazu gehörte es auch, die Ansprüche auf die Rohstoffe im Meer geltend zu machen. Entsprechend sah das SRÜ 1982 zunächst vor, eine internationale Meeresbodenbehörde zu schaffen, die eine eigene Bergbaugesellschaft, das „Enterprise“, gründen sollte. Die Gewinne, so die Idee, würden gerecht auf die verschiedenen Staaten verteilt. Die Industriestaaten sollten dem „Enterprise“ ihre Meeresbergbauexperten und das Maschinenbau-Know-how kostenfrei zum Wohle aller zur Verfügung stellen. Die ehemaligen Kolonien und Entwicklungsländer ratifizierten das SRÜ sofort, die Industrienationen hingegen protestierten.

In den folgenden Jahren wurden die Modalitäten eines künftigen Meeresbergbaus neu verhandelt, um das SRÜ konsensfähig zu machen. Unter anderem nahm man Abstand von der Forderung nach einem kostenlosen Technologietransfer. Die Gründung eines „Enterprise“ wurde auf unbestimmte Zeit verschoben. Diese neuen Regeln und Nachbesserungen wurden dann 1994 im sogenannten Durchführungsübereinkommen (DÜ) festgeschrieben, das das SRÜ ergänzt. Die im DÜ und SRÜ festgeschriebenen Regeln und Vorgaben werden heute durch 3 Organe umgesetzt:

- den Internationalen Seegerichtshof in Hamburg;
- die Festlandssockelgrenzkommission, die über die Ausweitung der AWZ einzelner Staaten entscheidet;
- die für den Meeresbergbau in der „Area“ zuständige Internationale Meeresbodenbehörde.

Das SRÜ und das DÜ geben allgemeine Regeln vor, die sowohl für die „Area“ als auch die 12-Seemeilen-Zonen und die AWZ der Nationalstaaten gelten. So haben sich die Unterzeichnerstaaten beispielsweise verpflichtet, Vorschriften zur Verringerung und Überwachung von Bergbautätigkeiten zu erlassen. Außerdem sollen seltene und empfindliche Ökosysteme und bedrohte Arten berücksichtigt werden. Zu vermeiden sind grenzüberschreitende

4.2 > Der Inselstaat Nauru ist die kleinste Republik der Welt und mit etwa 20 Quadratkilometern nur doppelt so groß wie die Insel Capri.



Verschmutzungen. Bei Verstößen können Unternehmen und Staaten für Schäden haftbar gemacht werden.

Präzise Vorgaben für den Meeresbergbau

Als konkrete Handlungsanweisungen sind die Formulierungen des SRÜ und des DÜ allerdings nicht tauglich, da sie zu allgemein gefasst sind. Speziell für den Meeresbergbau in der „Area“ hat die ISA deshalb 3 Regelwerke erlassen, die für jeden der 3 mineralischen Rohstoffe, Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfide, exakte Vorgaben liefern sollen. Bislang gibt es diese Regelwerke in konkreter Form erst für die ersten beiden Phasen des Meeresbergbaus: die Prospektion (Vorerkundung) und die Exploration (Erkundung) der Rohstoffgebiete. Da bei der Prospektion der Meeresboden nur relativ grob mit seismischen Methoden vom Schiff aus untersucht wird und kaum Bodenproben genommen werden, ist die Prospektion lediglich anzeigepflichtig. Für die Exploration hingegen, bei der der Meeresboden intensiv beprobt wird, ist eine Lizenz der ISA erforderlich. Ein Regelwerk für den industriellen Abbau fehlt noch und soll frühestens 2016 für Manganknollen in erster Fassung vorgelegt werden.

Dass es ein Regelwerk für den Abbau noch nicht gibt, liegt unter anderem daran, dass einige Umweltschutzfragen noch unbeantwortet sind. Derzeit werden verschiedene Gebiete intensiv exploriert. Auf Schiffsexpeditionen sammeln Forscher ständig neue Erkenntnisse über die Lebensräume am Boden. Diese werden in dem künftigen Regelwerk für den Abbau berücksichtigt, das in jedem Fall deutlich vor dem Beginn eines Manganknollenabbaus vorliegen soll. Für den wiederum gibt es noch von keiner Nation konkrete Planungen.

Eine Behörde für alle Staaten

Die ISA ist eine kleine Behörde mit knapp 40 ständigen Mitarbeitern aus verschiedenen Ländern. Sie konnte nur deshalb entstehen, weil sich die Staatengemeinschaft auf eine Nutzung von Ressourcen zum Wohle aller verständigen konnte. Die ISA erarbeitet erstmals in der Geschichte klare Regelwerke, bevor die Ausbeutung eines Rohstoffvorkommens beginnt. Ganz gleich, welchen Rohstoff man betrachtet – Kohle, Öl oder Erze an Land – bisher wurden



4.3 > Die Internationale Meeresbodenbehörde in Kingston, Jamaika, arbeitet daran, die Rohstoffe des Meeresbodens gerecht aufzuteilen.

stets zuerst Vorkommen abgebaut und die Umwelt zerstört, ehe man die Fehler erkannte und im Nachhinein versuchte, den Schaden zu begrenzen.

Die ISA ist zudem die Behörde, die entscheidet, ob ein Staat oder ein Unternehmen eine Lizenz erhält. Bislang wurden insgesamt rund 25 Lizenzen für die Erkundung (Exploration) vergeben. Lizenzen für den Abbau der Rohstoffe (Exploitation) wurden noch nicht erteilt. Staaten, die ein Meeresgebiet erkunden wollen, beantragen bei der ISA eine Explorationslizenz und müssen dafür eine Gebühr in Höhe von 500 000 US-Dollar entrichten. Auch Privatunternehmen können eine Lizenz beantragen. Der Antrag muss aber vom Heimatstaat befürwortet werden. Der befürwortende Staat bürgt dafür, dass das Unternehmen finanziell und technisch leistungsfähig ist. Zudem haftet er für dessen Tätigkeit. Eine Explorationslizenz ist für 15 Jahre gültig und kann einmalig um 5 Jahre verlängert werden. Interessant ist, dass alle Regelwerke ständig erweitert und nachgebessert werden können, sodass die ISA die Vorschriften an neue wissenschaftliche Erkenntnisse oder Abbautechnologien anpassen kann.

Nach den Regelwerken der ISA können heute auch Entwicklungsländer, die nicht über eigene Bergbauexperten verfügen, in den Meeresbergbau auf internationalem Gebiet einsteigen, indem sie eine Kooperation mit einem Bergbaukonzern eingehen, wenn dieser im Entwicklungsland eine Tochtergesellschaft gründet. Nach Entscheidung des Internationalen Seegerichtshofs ist das möglich, allerdings muss das Entwicklungsland ebenfalls für den Konzern haften. Eine der ersten Nationen, die diesen Weg gehen, ist der Inselstaat Nauru, der mit einem Bergbaukonzern beziehungsweise dessen in Nauru gegründeter Tochter kooperiert.

Schon geregelt: die Manganknollenexploration

Am weitesten entwickelt ist derzeit das Regelwerk für die Prospektion und Exploration von Manganknollen (Regulations on Prospecting and Exploration of Polymetallic Nodules, RPEN). Dieser Meeresrohstoff lässt sich leichter fördern als Kobaltkrusten und Massivsulfide und dürfte der erste sein, der im Bereich der „Area“ abgebaut wird. Erste Explorationslizenzen wurden bereits im Jahr 2001 an 6 Antragsteller vergeben, die „six pioneer states“ China, Japan, Frankreich, Russland, Südkorea sowie die International Seabed Authority, ein Zusammenschluss von Bulgarien, Tschechien, Slowakei, Polen, Russland und Kuba.

Das Regelwerk für Manganknollen enthält 40 Bestimmungen. Darin ist unter anderem festgelegt, dass ein Staat für die Exploration 2 wirtschaftlich gleichwertige, von ihm prospektierte Flächen von jeweils bis zu 150 000 Quadratkilometer Meeresboden beantragt – 2 Flächen, die jeweils so groß wie England und Wales zusammen sind. Die ISA wählt eine der beiden Flächen für sich selbst aus, „Reserved Area“ genannt. Für die andere Fläche erteilt sie dem Antragsteller dann eine Explorationslizenz.

Die „Reserved Area“ kann für das später zu gründende „Enterprise“ reserviert bleiben oder Entwicklungsstaaten zur Verfügung gestellt werden, die in Zukunft einmal in den Meeresbergbau einsteigen wollen. Welche Staaten das sind, steht heute allerdings noch nicht fest. Da die „Reserved Area“ bereits prospektiert ist, kann das Entwicklungsland später auf die kostspielige Vorerkundung verzichten und gleich mit der Exploration beginnen.

Das einem Staat zugeteilte Lizenzgebiet von maximal 150 000 Quadratkilometern wird nach den Regeln der ISA noch weiter reduziert. So muss der Lizenznehmer bis zum achten Jahr der Vertragslaufzeit 75 000 Quadratkilometer der explorierten Fläche an die ISA abtreten. Dieser Vorgang wird als Abtretung bezeichnet. Der Lizenznehmer darf also keine Flächen horten, sondern muss rechtzeitig entscheiden, auf welches Gebiet er die weitere Erkundung und den eventuellen späteren Bergbau konzentrieren will. Auf diese Art und Weise wird verhindert, dass sich eine Nation die attraktivsten Gebiete sichert. Beantragt ein Staat von vornherein nur 75 000 Quadratkilometer für die Exploration, entfällt die Abtretungsklausel.

Das Regelwerk für Manganknollen enthält darüber hinaus Vorgaben für die Art und Weise der Explorationstätigkeiten und für notwendige Umweltverträglichkeitsprüfungen. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung ist zum Beispiel während der Explorationsphasen mit intensiver Probennahme und für die Erprobung von Geräten Pflicht. Darüber hinaus können während der Exploration versuchsweise Sedimentwolken ausgelöst werden, wofür ebenfalls Umweltverträglichkeitsprüfungen vorgeschrieben sind. Ziel dieser Maßnahmen ist es, zu klären, wie sich der Betrieb von Maschinen in größerem Stil auf den Meeresboden auswirkt. Über den Fortgang der Exploration muss der Lizenznehmer der ISA regelmäßig Bericht erstatten. Zudem hat die ISA die Möglichkeit, auf dessen Forschungsschiffen unabhängige Beobachter mitfahren zu lassen. Die Vorschriften für die Exploration sollen in nächster Zeit weiter verschärft beziehungsweise präzisiert werden. Bis heute hat die ISA 13 Anträge für die Exploration von Manganknollen genehmigt.

Blockweise Massivsulfide explorieren

Die Regelwerke für die Prospektion und Exploration von Massivsulfid- und Kobaltkrustenvorkommen ähneln dem Regelwerk für Manganknollen. Im Detail aber gibt es Unterschiede. Das Regelwerk für die Massivsulfide von 2010 (Regulations on Prospecting and Exploration for Polymetallic Sulphides) erfasst die bisher bekannten Hydrothermalquellen mit Massivsulfiden, darunter circa 165 vermutlich abbauwürdige Vorkommen. Gemäß Regelwerk dürfen Antragsteller zunächst in einem Suchgebiet von maximal 300 000 Quadratkilometern Vorkommen ausfindig machen. Die anschließende Exploration müssen sie dann auf einen kleinen Teil dieses Gebietes beschränken. Für diese dürfen maximal 100 Bereiche (Blöcke) von höchstens 10 mal 10 Kilometern innerhalb des Suchgebiets beantragt werden. Die Blöcke müssen zu mindestens 5 verschiedenen Bündeln zusammengefasst werden. Die ISA will damit erreichen, dass sich Unternehmen oder Staaten nicht weit verstreute besonders ertragreiche Areale sichern, sondern ihre Aktivität auf enge Bereiche beschränken. Die eigentliche Explorationsfläche beträgt damit am Ende also maximal 10 000 Quadratkilometer (100 Blöcke à 100 Quadratkilometer). Darüber hinaus hat

auch dieses Regelwerk eine Abtretungsklausel. Innerhalb bestimmter Fristen muss der Großteil des Explorationsgebiets bis auf eine Restfläche von 2500 Quadratkilometern, in der sich dann vermutlich die besten Abbauchancen für den Antragsteller ergeben, an die ISA abgetreten werden. Auch hier verengt sich die Nutzungsfläche letztendlich also erheblich. Anträge für die Prospektion und Exploration von Massivsulfiden wurden inzwischen von China, Frankreich, Indien, Russland und Südkorea gestellt. Deutschland bereitet derzeit einen Antrag vor.

Regeln für die Erkundung von Kobaltkrusten

Das jüngste Regelwerk ist jenes für die Prospektion und Exploration von Kobaltkrusten (Regulations on Prospecting and Exploration for Cobalt-rich Ferromanganese Crusts), das bei der 18. Jahrestagung der ISA im Jahr 2012 verabschiedet wurde. Die Herausforderung lag darin, Regularien für einen Rohstoff zu entwickeln, für den es noch keinerlei Abbautechnologie gibt. Zudem kommen die Krusten auf Seebergen vor, die als besonders artenreiche Lebensräume bekannt sind. Viele dieser Habitats sind ohnehin durch die Fischerei und den Einsatz von Bodenschleppnetzen bedroht. Der Bergbau würde den Druck zusätzlich erhöhen. Gemäß Regelwerk dürfen Antragsteller zunächst während der Prospektionsphase in einem Gebiet von höchstens 550 mal 550 Kilometern nach interessanten Arealen suchen. Die sich daran anschließende Exploration muss sich dann auf maximal 150 Blöcke mit einer Fläche von je höchstens 20 Quadratkilometern beschränken. Diese Blöcke sollen in Clustern zu maximal 5 Blöcken gebündelt sein. Zwei Drittel des Explorationsgebiets müssen bis spätestens zum zehnten Jahr der Explorationsphase an die ISA abgetreten werden. Über einen russischen Antrag berät die ISA derzeit. China und Japan haben bereits Explorationslizenzen erhalten. Damit ist China der erste Staat weltweit, der über Explorationslizenzen für alle 3 mineralischen Rohstoffe verfügt.

Den Weg für den Abbau ebnen

Für alle 3 Regelwerke gilt, dass die ISA den explorierenden Staaten eine Art Führungszeugnis ausstellt. Sollte sich während der Exploration herausstellen, dass der

Die Exploration und der künftige Abbau von Manganknollen

Seerechtsübereinkommen (Artikel 136)

definiert die mineralischen Ressourcen im internationalen Gebiet des Meeresbodens („Area“) als „Gemeinsames Erbe der Menschheit“

Internationale Meeresbodenbehörde (ISA)
legt Regeln für Prospektion und Exploration fest. Regeln für den Abbau (Exploitation) werden frühestens 2016 vorliegen

Staat prospektiert ein großes Meeresgebiet; die Prospektion muss bei der ISA lediglich angezeigt werden

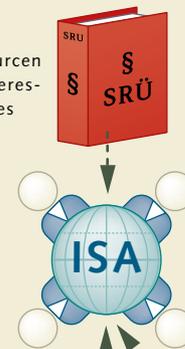
Staat beantragt bei der ISA eine Explorationslizenz für 2 je 150 000 Quadratkilometer große und wirtschaftlich gleichwertige Flächen im bereits prospektierten Gebiet

ISA wählt eine Fläche aus und behält diese als „Reserved Area“ zur späteren Nutzung durch das „Enterprise“ oder Entwicklungsländer

Der Staat erhält eine Fläche für die Exploration

Nach spätestens 8 Jahren tritt der Staat 75 000 Quadratkilometer der explorierten Fläche an die ISA ab („Relinquishment“)

75 000 Quadratkilometer verbleiben für den Meeresbergbau, wobei die Fläche nur zu einem Teil abgebaut wird. Es bleiben Referenzzonen für die Erhaltung der Biodiversität ausgespart. Zudem sollen nur Areale mit hoher Knollendichte abgeerntet werden



4.4 > Das Reglement der ISA sieht vor, dass ein Land zunächst ein großes Explorationsgebiet erhält, von dem es später eine Hälfte an die ISA abtreten muss. Diese Hälfte bleibt für Entwicklungsländer reserviert. Jene Hälfte die dem Staat zusteht, darf indes nicht gänzlich abgebaut werden. Dort sind Teilflächen zu schützen, damit die Tiefseefauna erhalten bleibt.

Antragsteller Naturräume zu stark schädigt oder Regeln nicht einhält, kann ihm eine Verlängerung der Explorationsphase oder die Genehmigung für einen künftigen Abbau verwehrt werden. Tatsächlich kann die ISA dem Staat damit die Lizenzen für alle 3 mineralischen Rohstoffe entziehen.

Zwar gibt es noch keine vollständig fertig ausformulierten Regelwerke für den Abbau von Meeresrohstoffen, aber der Generalsekretär der ISA hat 2012 einen Arbeits- und Zeitplan vorgelegt, in dem die Anforderungen formuliert sind, die das für 2016 vorgesehene Regelwerk für den Manganknollenabbau enthalten muss. Demnach soll unter anderem:

- der Einstieg in die Abbauphase mit einem „Mining Test“ beginnen, dessen Maßstab mit 20 bis 50 Prozent eines kommerziellen Vorhabens angegeben wird. Die Erkenntnisse, die man aus solch einem „Mining Test“ gewinnt, sollen fortan im Regelwerk berücksichtigt werden – insbesondere was die Sicherheit und den Umweltschutz betrifft;
- für die gesamte Abbauphase werden ein umfangreiches Umweltbeobachtungsprogramm (Monitoring) und weitere Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) vorgeschrieben. Beim Monitoring handelt es sich um eine langjährige permanente wissenschaftliche Beobachtung und Dokumentation aller Tätigkeiten. Umweltverträglichkeitsprüfungen hingegen werden zusätzlich für einzelne Tätigkeiten durchgeführt. Sowohl das Monitoring als auch die Umweltverträglichkeitsprüfungen sollen permanent an den aktuellen Wissensstand und die neueste Fördertechnologie angepasst werden;
- der Antragsteller detaillierte Informationen über den gesamten Produktionsprozess liefern. Dazu gehören Angaben zur Kollektortechnik, zur Eindringtiefe ins Sediment, zur Reinigung und Aufbereitungstechnik vor Ort, zum Transport der Knollen vom Meeresboden zum Schiff, zur Zerkleinerung der Knollen vor Ort, zum Wiedereinleiten von Produktionsabfällen (Tailings), zum Ort und zur Dauer des Tests und zu den Umweltauswirkungen.

Diskutiert wird derzeit, ob zunächst vorläufige Bergbaulizenzen für einen Zeitraum von etwa 3 Jahren vergeben werden sollen, um dem Vorsorgeansatz zu genügen und weitere Erfahrungen zu sammeln. Gibt es keine Bedenken, soll der Antragsteller nach 3 Jahren eine reguläre Abbaulizenz erhalten.

Unklar ist derzeit, wie hoch die künftigen Förderabgaben sein werden. Geprüft werden soll ein System von Förderabgaben oder ein kombiniertes System von Förderabgaben und Gewinnbeteiligung der ISA. Zusätzlich könnte mit dem Produktionsbeginn eine feste Jahresgebühr fällig werden, deren Höhe noch nicht feststeht. Für die Bergbauunternehmen werden diese finanziellen Regelungen neben den Umweltschutzaufgaben darüber entscheiden, ob sie in den Meeresbergbau in der „Area“ einsteigen.

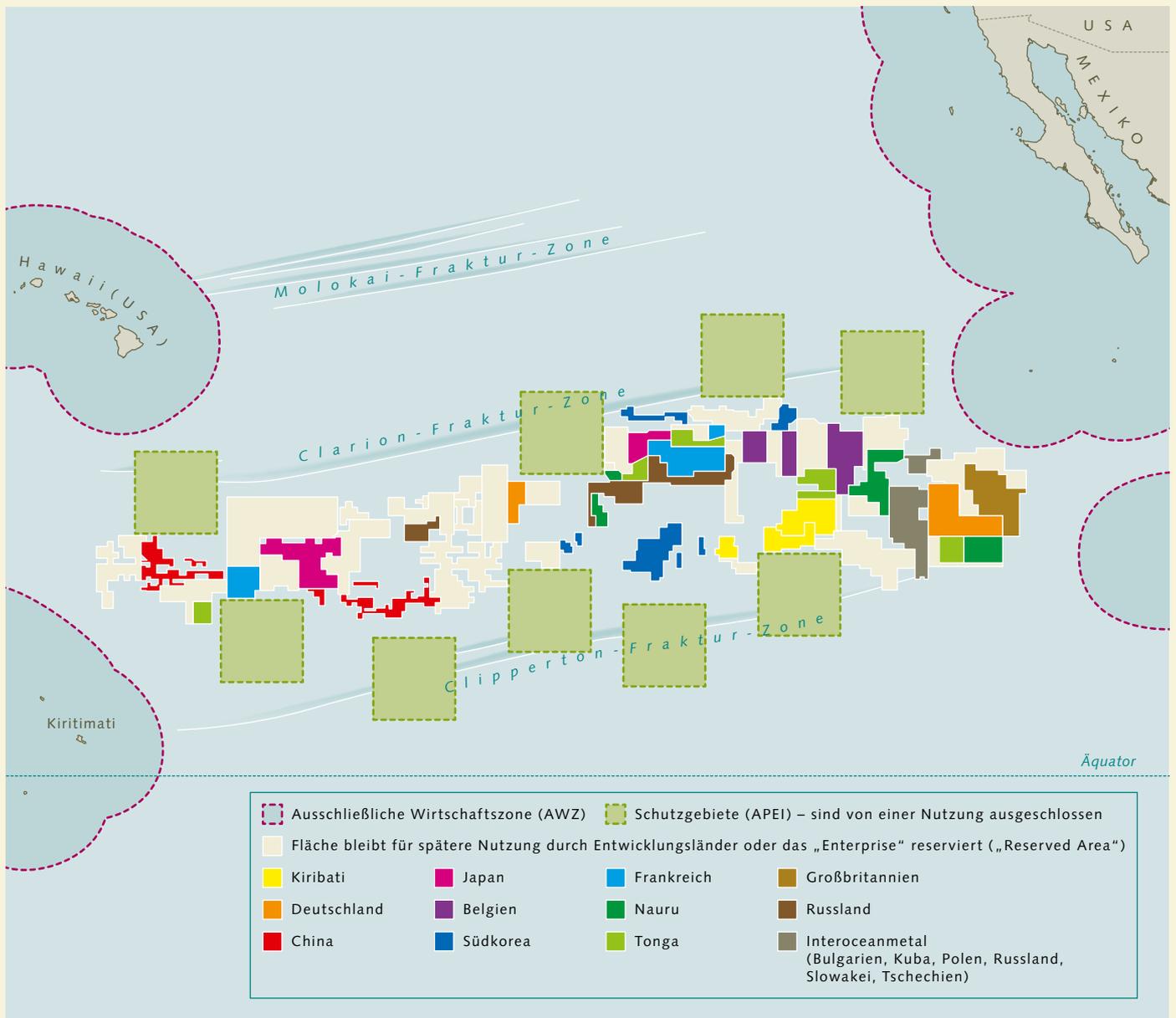
Für die Zukunft plant die ISA, sämtliche Regelwerke, also sowohl die Regelwerke für die Prospektion und Exploration als auch die Exploitation, in einem einzigen Bergbaugesetzbuch, dem sogenannten Miningcode, zu verschmelzen.

Die Meeresbodenbehörde als Firma?

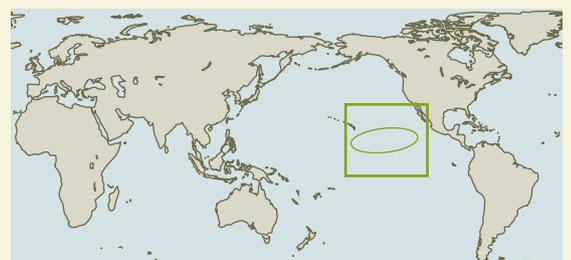
Interessant ist, dass die Diskussion um die Gründung eines „Enterprise“ jüngst wieder aufgelebt ist. Anlass dafür war die Anfrage eines kanadisch-australischen Bergbaukonzerns, der der ISA angeboten hatte, Meeresbergbau im Rahmen eines Joint Venture mit dem „Enterprise“ zu betreiben und die erforderliche Abbautechnik einzubringen. Grundsätzlich ist eine solche Gründung in den Grenzen des Durchführungsübereinkommens des SRÜ durchaus möglich. Zudem würde diese Konstruktion keineswegs der Idee der Verteilungsgerechtigkeit widersprechen. Das „Enterprise“ würde nicht mit einzelnen Staaten um Gebiete konkurrieren, sondern auf nicht vergebenen Flächen Bergbau betreiben. Außerdem könnten die Gewinne des „Enterprise“ wiederum gerecht verteilt werden. Die ISA würde demnach in Zukunft zweigleisig arbeiten: als Behörde, die Lizenzen vergibt, und als „Enterprise“. Bis heute aber gibt es noch keine klaren Regeln für die Gründung eines „Enterprise“, sodass die ISA die Gründung oder Planung eines Joint Venture für verfrüht hält. Bis entsprechende Regeln verabschiedet sind, dürften noch mehrere Jahre vergehen.

Vorsorgeansatz

Der Vorsorgeansatz ist ein Prinzip der Risikovorsorge, das während der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro formuliert wurde. Gemäß dem Vorsorgeansatz sollen Staaten Tätigkeiten unterlassen, die die Umwelt schädigen könnten, selbst wenn die Gefährlichkeit der Tätigkeit wissenschaftlich noch nicht eindeutig nachgewiesen wurde. Der Vorsorgeansatz wurde als Prinzip Nummer 15 in der Rio-Deklaration festgeschrieben.



4.5 > Die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) im Pazifik ist das größte Manganknollengebiet weltweit und etwa so groß wie Europa. Die Internationale Meeresbodenbehörde hat für die CCZ bis heute 12 Explorationslizenzen vergeben. Die „Reserved Areas“ und Schutzgebiete sind bereits definiert.



Bergbau und Naturschutz – gelingt die Quadratur des Kreises?

Das weltweit bei Weitem größte Gebiet mineralischer Meeresrohstoffe ist die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) im Pazifik, in der auf einer Fläche von der Größe Europas viele Milliarden Tonnen Manganknollen liegen. Um in diesem riesigen Areal Lebensräume in nennenswerter Größe zu erhalten, beschloss die ISA während ihrer 18. Jahrestagung 2012 einen Umweltmanagementplan (UMP). Mit diesem Plan wurden für die CCZ 9 Schutzgebiete (Areas of Particular Environmental Interest, APEI) ausgewiesen, in denen der Meeresbergbau verboten ist. Die APEI bestehen jeweils aus einem rechtwinkligen Kerngebiet mit einer Seitenlänge von 200 mal 200 Kilometern und einem zusätzlichen Streifen (Pufferzone) von 100 Kilometern, durch den verhindert werden soll, dass Sedimentwolken aus den Abbaugebieten in das Schutzgebiet driften und dort möglicherweise Bodenlebewesen unter sich begraben oder schädigen. Insgesamt ergeben sich somit 9 Gebiete mit der Kantenlänge 400 mal 400 Kilometer und einer Fläche von jeweils 160 000 Quadratkilometern. Die 9 APEI bringen es damit auf eine Fläche von knapp 1,5 Millionen Quadratkilometern, was in etwa einem Sechstel der gesamten CCZ-Fläche und gut der doppelten Größe der Türkei entspricht.

Bislang gibt es einen Umweltmanagementplan und entsprechende APEI nur für die CCZ, nicht aber für andere Lizenzgebiete wie etwa im Indischen Ozean, was nach Ansicht von Experten allerdings notwendig wäre.

Der Umweltmanagementplan reicht noch weiter. Er legt nicht nur die 9 APEI fest, sondern verpflichtet die Lizenznehmer auch, für ihr beantragtes Gebiet Areale mit repräsentativen Lebensräumen und Artenzusammensetzungen auszuweisen, bevor sie mit dem Abbau beginnen. Diese Referenzzonen müssen groß genug, von vergleichbarer Topographie und Biodiversität wie die Abbaufäche sein und dürfen nicht bearbeitet werden. Das bedeutet letztlich, dass die Lizenzgebiete nicht in Gänze abgeräumt, sondern eher stückweise abgeerntet werden dürfen. Das Ziel ist es auch in diesem Fall, dass Flächen erhalten bleiben, aus denen das abgeerntete Areal wiederbesiedelt werden kann. Zurzeit entwickelt die ISA Leitlinien für die Ausweisung dieser Referenzzonen.

Kritiker merken allerdings an, dass man bisher noch zu wenig über die Lebensräume der CCZ wisse. Noch gebe es keine Standards für die Begutachtung und Bewertung der Lebensräume, mit denen man Referenzgebiete überhaupt zuverlässig auswählen könne, denn Sinn dieser Gebiete sei es ja, für die Region repräsentative Lebensräume zu erhalten. Darüber hinaus müssten Lebensräume mit einzigartigen, endemischen, Lebewesen besonders geschützt werden.

Die Zerstörung des Allmende-Ideals

Trotz kritischer Stimmen, wonach der ISA tiefgreifende Möglichkeiten zum umfassenden Schutz in sämtlichen internationalen Gewässern fehlen, gilt die Arbeit der ISA als nahezu vorbildlich. Denn die ISA handelt nach dem Vorsorgeansatz, wie ihn unter anderem die Biodiversitätskonvention verlangt. Zudem sorgt die ISA dafür, dass die Ressourcen als gemeinsames Erbe der Menschheit gerecht verteilt werden. Insofern betrachten Wissenschaftler die von einigen Staaten vorangetriebene Ausweitung ihres Einflussbereichs über die AWZ hinaus bis in den äußeren Festlandsockel mit Sorge. Die dafür in Anspruch genommene Ausnahmeregelung zum Festlandsockel bedeutet, dass dort befindliche Rohstofflagerstätten von einzelnen Staaten allein beansprucht werden.

Nach Ansicht von Experten treibt diese ursprüngliche Ausnahmeregelung derzeit bizarre Blüten. Russland etwa beansprucht rund 40 Prozent des Meeresbodens im internationalen arktischen Gebiet als eigenen Festlandsockel. Die Argumentation: Die unterseeischen Gebirge in der zentralen Arktis, beispielsweise der Gakkelrücken, seien eine geologische Struktur, die ihren Ursprung innerhalb der russischen AWZ habe. Gemäß Definition dürfte Russland seinen Einflussbereich damit bis auf 350 Seemeilen ausdehnen. Hinzu kommt die zweite Regelung des SRÜ: die Erweiterung des Anspruchs auf bis zu 100 Seemeilen jenseits der 2500-Meter-Tiefenlinie. Damit würde der Einflussbereich Russlands noch über die 350-Seemeilen-Grenze hinausgehen. Da sich beide Methoden kombinieren lassen, würden sich die Flächen nach Vorstellung der russischen Behörden auf 40 Prozent des Meeresbodens summieren und damit ihre Bodenschätze im arktischen Gebiet. Die Festlandsockelgrenzkommision hat

Der Wunsch nach mehr Schutzgebieten auf internationalem Meeresboden

Kritisiert wird auch, dass die ISA bislang keine wertvollen Lebensräume am Meeresboden außerhalb der Lizenzgebiete unter Schutz stellt, obwohl sie als Meeresbodenbehörde, die durch das SRÜ legitimiert ist, dafür prädestiniert wäre. Derzeit ist die Ausweisung von Meeresschutzgebieten im Bereich der Hohen See ausgesprochen kompliziert, weil viele verschiedene Organisationen darüber befinden. Außerdem beziehen sich einige Schutzgebiete nur auf den Schutz der Lebewesen und insbesondere der Fische in der Wassersäule, andere nur auf den Schutz von Lebensgemeinschaften am Meeresboden.

Die Internationale Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organisation, IMO) etwa kann zur Verkehrslenkung PSSAs (Particularly Sensitive Sea Area, besonders sensibles Meeresgebiet) ausweisen, in denen der Schiffsverkehr eingeschränkt oder verboten ist, beispielsweise um bedeutende Fischgründe, Aufzuchtgebiete von Walen oder archäologisch wichtige Regionen zu schützen, etwa das Great Barrier Reef vor der australischen Nordostküste. Diskutiert wird im Kreise der IMO derzeit, auch die Sargassosee im Westatlantik als PSSA zu schützen. Auf weiten Flächen treibt hier der Sargassotang im Wasser, der für viele Lebewesen einen besonderen Lebensraum darstellt. Allerdings schränkt ein PSSA nur die Handelsschifffahrt ein, indem es die Durchfahrt reglementiert.

In anderen Regionen wiederum kann die Fischerei in Marine Protected Areas (MPAs, Meeresschutzgebiete) eingeschränkt werden. Derartige Areale wurden von der Oslo-Paris-Konvention (OSPAR) für den Nordostatlantik vorgeschlagen, einer regionalen Meeresschutzkonvention, zu deren Mitgliedern mehrere west- und nordeuropäische Staaten zählen. Die für den Nordostatlantik zuständige Fischereimanagementorganisation ist der OSPAR gefolgt und hat die Grundschieppnetzfisherei in den meisten dieser nordostatlantischen Gebiete tatsächlich eingestellt.

Diese Beispiele machen deutlich, wie komplex die Etablierung von Schutzgebieten ist, durch die meist ohnehin nur einzelne Bereiche des Meeres geschützt sind. Erschwerend kommt hinzu, dass die Schutzgebietsregelungen stets nur für die wenigen Vertragsstaaten des jeweiligen Abkommens bindend sind. Andere Staaten können die Regelungen ignorieren. Wünschenswert wäre vielmehr ein allgemein verpflichtender Schutz eines Lebensraums vom Meeresboden bis zur Wasseroberfläche. Den gibt es bislang aber praktisch nicht.

In den OSPAR-Gebieten am Mittelatlantischen Rücken ist bislang nur der Einsatz von Bodenschleppnetzen verboten. Für einen vollständigen Schutz wäre es sinnvoll, dass auch die ISA diese

MPAs anerkennt und den Meeresboden in diesen Regionen als Schutzgebiet deklariert. Damit wären die Seeberge und Bänke für die Zukunft nicht nur vor Grundschieppnetzen, sondern auch vor künftigen Bergbauinteressen geschützt. Die ISA aber kann die Gebiete bislang nicht anerkennen, weil sie nur für den Bergbau zuständig ist. Um schützenswerte Gebiete in den internationalen Gewässern unter Schutz stellen zu können, müsste zunächst ein Durchführungsabkommen zur Protektion biologischer Vielfalt für das SRÜ beschlossen werden, das seit einigen Jahren von einer UN-Arbeitsgruppe vorbereitet wird. Der entsprechende Prozess aber verläuft nur schleppend.

Das ist kaum zu entschuldigen, denn der umfassende Schutz wertvoller Meeresgebiete wird seit vielen Jahren von höchster Stelle gefordert. So verabschiedete die Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro die internationale Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD), deren Ziel es ist, die Artenvielfalt auf der ganzen Welt an Land und im Meer zu erhalten. Die Biodiversitätskonvention fordert in ihren jüngsten Beschlüssen, auch in Gebieten jenseits nationaler Zuständigkeit Meeresschutzgebiete zu schaffen und sogenannte ökologisch oder biologisch bedeutende Gebiete (Ecologically or Biologically Significant Marine Areas, EBSAs) zu benennen.

Der **Rio+20-Gipfel** im Jahre 2012 hat die Staatengemeinschaft deshalb dazu aufgefordert, den laufenden Prozess zur Entwicklung eines entsprechenden Durchführungsübereinkommens zum Schutz biologischer Vielfalt rasch zu einem Ergebnis zu bringen. Bis jetzt sind im SRÜ und damit auch im Instrumentarium der ISA Meeresschutzgebiete nur sehr eingeschränkt vorgesehen. Die ISA kann damit keine Meeresschutzgebiete außerhalb von Meeresbergbaregionen ausweisen oder solche Flächen anerkennen. Angesichts des großen Drucks auf die Lebensräume am Meeresboden ist es ein unhaltbarer Zustand, dass die Vorbereitung des Durchführungsübereinkommens so schleppend verläuft.

Die OSPAR-Kommission hat Beobachterstatus bei der ISA und verhandelt mit ihr und den anderen maritimen Organisationen wie etwa der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation oder der International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT, Internationale Kommission für den Schutz des atlantischen Thunfisches) um die baldige Etablierung von umfassenden Meeresschutzgebieten. Wichtige Voraussetzung dafür aber bleibt die Verabschiedung eines Durchführungsabkommens zum Schutz biologischer Vielfalt im SRÜ, das die Biodiversität an sensiblen Orten generell sichert.

Nationalstaatliche Alleingänge anstelle von weltweitem Miteinander

Das Seerechtsübereinkommen regelt die Nutzung der Meere, die 71 Prozent der Erdoberfläche einnehmen. Die Tatsache, dass das SRÜ von 165 Staaten und der Europäischen Union unterzeichnet und **ratifiziert** wurde, macht es zu einem potenten internationalen Regelwerk. Andererseits sind rund 40 Staaten dem SRÜ aus ganz unterschiedlichen Gründen nicht beigetreten. Trotz alledem sind diese Staaten an viele Elemente des SRÜ gebunden, soweit diese als **Völkergewohnheitsrecht** universelle Geltung haben, beispielsweise an den Meeresschutz. Gemäß Völkergewohnheitsrecht kommt noch eine andere Regelung zum Tragen: Obwohl die Staaten das SRÜ nicht ratifiziert haben, dürfen sie dennoch eine AWZ beanspruchen.

Der prominenteste Verweigerer sind die Vereinigten Staaten, die das Übereinkommen zwar unterzeichnet, aber nicht ratifiziert haben. Obwohl der US-Präsident und die Regierung schon länger bereit sind, zu ratifizieren, muss der US-Senat noch zustimmen. Der aber sieht sich nicht in der Lage, sich zu einer Mehrheit durchzuringen.

In den USA wird das Thema SRÜ seit Langem auch öffentlich diskutiert. Unlängst forderten hochrangige Offiziere der Marine und der Küstenwache öffentlich, dem SRÜ beizutreten. Sie weisen darauf hin, dass ohne Beitritt den USA allein die militärische Präsenz auf der Hohen See bleibt, um das eigene Recht durchzusetzen. Das sei angesichts der zunehmenden Ansprüche vieler Nationen auf den äußeren Festlandsockel bei Weitem nicht ausreichend. Man befürchtet, wichtige Gebiete mit großen Mengen an Rohstoffen vor allem im pazifischen Raum an andere Staaten zu verlieren. Zudem halten die Offiziere wie auch zahlreiche Politiker eine Ratifizierung für unerlässlich, um auch in anderen Seerechtsstreitigkeiten glaubwürdig zu sein und auf Augenhöhe verhandeln zu können. Da die USA Ansprüche über die Erweiterung des Festlandsockels nur über das SRÜ und die Festlandsockelgrenzkommision geltend machen können, gibt es für die USA auf Dauer keine Rechtssicherheit. Insbesondere wenn andere Staaten exzessive Ansprüche zur Ausdehnung ihres Einflussbereichs über die AWZ hinaus stellen, wie etwa für die Arktis, fehlen den USA die rechtlichen Mittel, um dagegen vorzugehen.

Die Antwort der Gegner eines SRÜ-Beitritts kam prompt und war heftig. So wetterten zahlreiche Politiker aus den Reihen der Republikaner, dass es unerträglich sei, Lizenzgebühren an Entwicklungsländer zu zahlen. Dieses neuartige Prinzip, Wohlstand umzuverteilen, sei ein Fass ohne Boden und eine ernste Gefahr für US-Unternehmen. Wann die USA das SRÜ ratifizieren, ist derzeit nicht abzusehen.

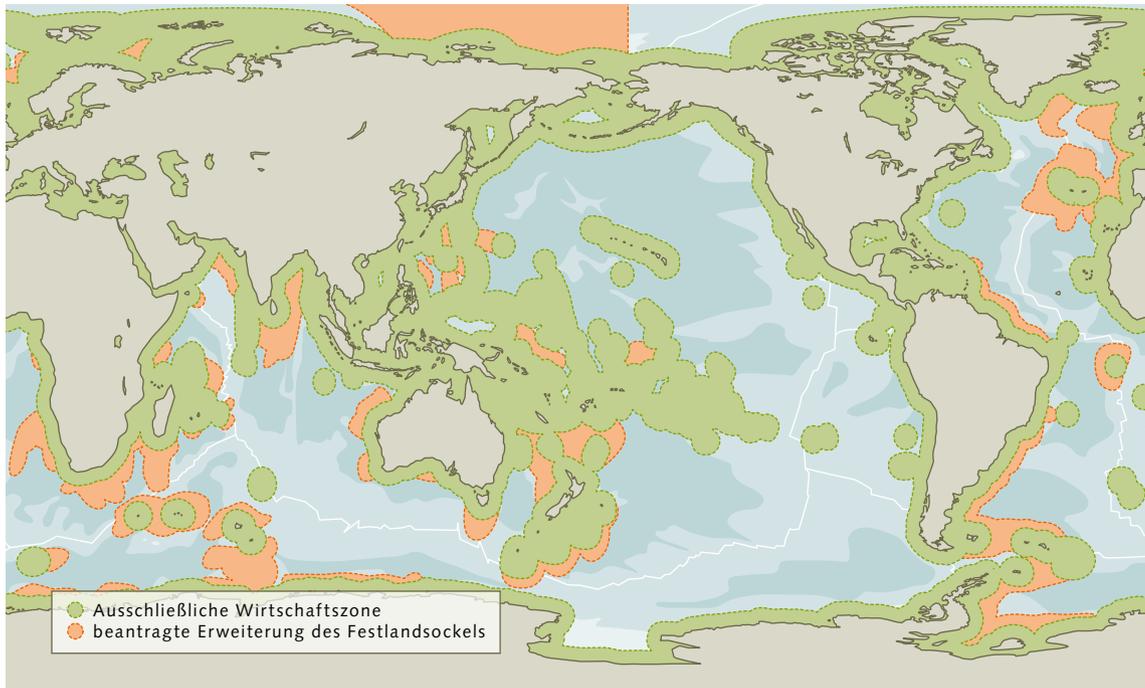
Andere Staaten treten dem SRÜ nicht bei, weil es Grenzkonflikte gibt. Der Iran etwa ratifiziert das SRÜ nicht, weil es Streitigkeiten um die Abgrenzung der AWZ im Kaspischen Meer gibt, in dem sich große Ölvorkommen befinden.

Und auch Peru will dem SRÜ nicht beitreten, weil Konflikte um die Lage der AWZ mit dem Nachbarland Chile schwelen. Hinzu kommt, dass Peru vor rund 50 Jahren, lange vor Schaffung der Ausschließlichen Wirtschaftszonen, ein Meeresgebiet von 200 Seemeilen als Küstenmeer und damit als Hoheitsgebiet für sich reklamiert hat und dies in seiner Nationalverfassung verankerte. Würde Peru dem SRÜ beitreten, müsste das Land das Seegebiet zur AWZ herabstufen, in der es künftig lediglich Nutzungsrechte genießen würde. Zudem wäre dafür eine Verfassungsänderung nötig, die in Peru bis heute politisch nicht durchsetzbar ist.

Für viele Staaten stehen nationale Interessen weit über dem Gemeinwohl. Damit ist auch zu erklären, dass die Anrainerstaaten der Arktis immer wieder aufs Neue mit diplomatischer Symbolik ihren Anspruch auf die Rohstoffe unter dem Eis verteidigen. Am 1. August 2007 platzierten russische Forscher medienwirksam die russische Fahne in einer Tiefe von mehr als 4000 Metern am Grunde der Arktis, um ihren Anspruch auf das Gebiet jenseits der russischen AWZ zu unterstreichen. Kurz vor Weihnachten 2010 stellte der seinerzeit für Einwanderungsfragen zuständige kanadische Minister Jason Kenney dem Weihnachtswann symbolisch einen kanadischen Pass aus. Da der Nordpol zum kanadischen Territorium gehöre, habe der Weihnachtswann nun das Recht, frei ein- und auszureisen. Auch über diese, wenn auch nicht ganz ernst gemeinte Geste, mit der Kanada seinen Besitzanspruch auf die Arktis unterstrich, wurde weltweit berichtet.

Zwar kann von einem harten Kampf um die Arktis nicht die Rede sein, dennoch wollen einige Länder Stärke demonstrieren, denn es geht um neue Seewege sowie Öl- und Gasvorkommen. Forscher haben in der Arktis auch einige kleine Manganknollenvorkommen gefunden, doch sind die Vorkommen als wirtschaftlich eher unbedeutend zu betrachten.

Letztlich wird die Festlandsockelgrenzkommision aufgrund geologischer Daten entscheiden, ob die jeweiligen nationalen Gebietsansprüche gerechtfertigt sind oder nicht. Welche Nationen ihren Einflussbereich danach ausweiten dürfen, steht derzeit noch nicht fest. Doch haben unlängst Kanada und Russland den Bau neuer eisfester Kriegsschiffe und die Errichtung neuer Stützpunkte im hohen Norden in Auftrag gegeben, um die Sicherheit vor ihren Küsten gewährleisten zu können – und auch, um ihre Macht zu demonstrieren.



4.6 > Durch die Erweiterung der Ausschließlichen Wirtschafts-zonen (grün) der Küstenstaaten bis in den Bereich des äußeren Festlandssockels (orange) verringert sich das internationale Meeresgebiet. Der Staatengemeinschaft gehen damit Flächen verloren. Die Antarktis wiederum hat einen Sonderstatus. Dort beanspruchen zwar einige Staaten eine eigene AWZ wie hier in der Grafik eingezeichnet. Doch sind diese Territorialforderungen völkerrechtlich nicht anerkannt.

den Antrag Russlands im Jahr 2009 indes abgelehnt und genauere geologische Untersuchungen gefordert. Seitdem hat Russland mehrere Expeditionen durchgeführt, um geologische Daten zu sammeln und die Verwandtschaft der Meeresrücken im internationalen Gebiet der Arktis mit den geologischen Bodenstrukturen in seiner AWZ zu belegen. Ende 2013 hat Kanada ebenfalls Ansprüche auf einen Festlandssockel bis zum Pol angekündigt. 2014 soll der russische Antrag mit neuen Daten vorgelegt werden, zeitgleich übrigens mit einem zu erwartenden Antrag Dänemarks auf Erweiterung seines Festlandssockels nördlich von Grönland.

Dänemark, Kanada und Russland sind keine Einzelfälle. Immerhin erheben derzeit 78 Staaten Ansprüche auf Erweiterung des Festlandssockels über die bisherige AWZ hinaus. 7 begründete Anträge liegen der ISA derzeit vor, ebenso wie 46 vorläufige Anträge, deren wissenschaftliche Begründung nachgereicht werden kann. Letztere wurden von der Festlandssockelgrenzkommission noch nicht bearbeitet, da es ähnlich wie im Fall Russlands noch an profunden wissenschaftlichen Daten fehlt, die beweisen, dass die geologischen Strukturen innerhalb und außerhalb der jeweiligen AWZ zusammengehören. See-

rechtsexperten betrachten diesen Trend zur Erweiterung des Festlandssockels als Pervertierung der ursprünglichen Idee der „Area“ als eine Art Allmende – also ein Grund und Boden, der allen Nationen zu gleichen Teilen dienen soll. Hinzu kommt, dass bereits die 200 Seemeilen breiten AWZ in bestimmten Regionen einen Großteil des Meeresgebiets beanspruchen. Im Gebiet der pazifischen Inselstaaten etwa liegen die einzelnen Inseln zum Teil so weit auseinander, dass Staaten trotz der kleinen Landfläche enorm große Areale als AWZ beanspruchen können. Auf viele der vorkommenden Rohstoffe hat die Staatengemeinschaft also ohnehin keinen Anspruch. Schon heute nehmen die AWZ rund ein Drittel der Meeresfläche ein. Alle bei der Festlandssockelkommission beantragten Flächen zur Erweiterung der AWZ bringen es zusammen auf zusätzliche 8 Prozent der Meeresfläche.

Ein Ende der Entwicklung ist derzeit nicht abzusehen. Einige Anträge wurden bereits von der Festlandssockelgrenzkommission akzeptiert. Beispielsweise haben Großbritannien und Irland ihre Festlandssockel in den Atlantik hinaus erweitern dürfen. Großbritannien will dort insbesondere Öl fördern und sucht derzeit Anbieter, die in die Ölförderung im neuen Territorium einsteigen wollen.

Allmende

Mit Allmende werden Landflächen bezeichnet, die Bürger einer Gemeinde gemeinsam nutzen – beispielsweise Äcker, Weiden oder Hutewälder. Der Begriff wird von Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern auch über den landwirtschaftlichen Kontext hinaus benutzt, etwa für den Fischfang in internationalen Gewässern. Häufig verwendet wird die Formulierung „Tragik der Allmende“. Die Tragik liegt darin, dass diese Ressourcen zwar allen offenstehen, dadurch aber schnell übernutzt und verloren sein können.

Von der Eigenverantwortung der Küstenstaaten

> Erdgas, Erdöl und Massivsulfide finden sich in großen Mengen vor den Küsten einzelner Nationen. Will ein Staat Rohstoffe in seinem Einflussbereich abbauen, muss er sich zwar an das internationale Seerechtsübereinkommen halten, maßgeblich sind aber auch die eigenen Bergbau- und Umweltschutzgesetze, die er selbst formuliert. Diese wiederum sind nicht immer ausreichend, wie die Folgen der Explosion der Ölplattform „Deepwater Horizon“ gezeigt haben. Insofern wird der nationalstaatliche Meeresbergbau auch kritisch gesehen.

Jeder muss seinen Teil beitragen

Die Erkundung und der Abbau bestimmter Rohstoffe am Tiefseeboden werden durch Vorgaben der Internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) klar geregelt. Auch Umweltschutzaspekte werden darin berücksichtigt. Damit liegen weltweit einheitliche Regeln für den künftigen Abbau von Rohstoffen im internationalen Gebiet des Tiefseebodens vor. Für die Ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) der Küstenstaaten und ihre Festlandsockel gibt es kein vergleichbares einheitliches Regelwerk. Zwar verpflichtet das Seerechtsübereinkommen (SRÜ) jeden Nationalstaat, das Meer zu schützen. Im Detail aber erlässt jeder Staat eigene Gesetze zur Nutzung seiner Ausschließlichen Wirtschaftszonen, zum Meeresbergbau auf dem Festlandsockel und zum Schutz der Meeresumwelt. Doch wie die anhaltende Verschmutzung von Küstengewässern oder Unglücke wie die Explosion der Bohrplattform „Deepwater Horizon“ zeigen,

ist das keineswegs eine Garantie dafür, dass die Meeresumwelt tatsächlich geschützt wird. Dabei haben die Nationalstaaten eine besondere Verantwortung, denn die Küstengewässer innerhalb der AWZ sind die weltweit am intensivsten genutzten Meeresgebiete und für viele Menschen Einkommens- und Nahrungsquelle.

Im Laufe der Zeit hat der Druck auf die AWZ zugenommen. Früher lieferten die Küstengewässer vor allem Fisch. Im vergangenen Jahrhundert entwickelte sich die Tourismusindustrie, später wurden an der Küste Industrieanlagen und auf dem Festlandsockel Gas- und Ölbohrinseln errichtet. Abwässer aus Fabriken und aus der intensiven Landwirtschaft belasten die küstennahen Gebiete bis heute. In den kommenden 5 Jahren dürfte in vollem Umfang auch der Meeresbergbau hinzukommen, vor allem der Abbau von Massivsulfiden, die zu einem großen Teil auf dem Festlandsockel zu finden sind.

Der Meeresbergbau unter staatlicher Regie

Angesichts der großen Bedeutung der Meeresgebiete und der Fülle an Belastungen sollten die Staaten ihre Meeresgebiete besonders pfleglich behandeln. Zwar gibt es entsprechend umfassende Vorgaben im SRÜ. Da diese aber sehr allgemein formuliert sind, bleibt für die Staaten bei der Umsetzung in nationales Recht viel Spielraum. Im Zweifelsfall schützen die nationalstaatlichen Gesetze das Meer nicht stark genug vor einer Ausbeutung und Verschmutzung. Hinzu kommt, dass nicht alle Staaten dafür sorgen, dass Umweltgesetze eingehalten und Industrieunternehmen regelmäßig überprüft werden. Trotz geltender Gesetze sind Umweltverschmutzung und -zerstörung in vielen Staaten gang und gäbe. Experten fürchten daher, dass manche Staaten auch im Fall des Meeresbergbaus im Bereich ihres Festlandsockels möglicherweise so verfahren werden. Sie könnten Investoren ins Land locken,

4.7 > Vor der chinesischen Küste bei Qingdao badet ein Junge in einem Teppich aus Algen. Eine der Ursachen der Algenblüte ist Überdüngung. Auch andernorts werden Küstengewässer trotz internationaler Meereschutzvereinbarungen verschmutzt.





4.8 > Nachdem im Juli 2010 das Auffangbecken einer Kupfermine in der chinesischen Küstenprovinz Fujian geborsten war, floss giftiges Abwasser in einen Fluss. 1900 Tonne tote Fische wurden geborgen.

indem sie diesen in Aussicht stellen, Geschäfte betreiben zu können, ohne hohe und kostspielige Umweltauflagen erfüllen oder Überprüfungen fürchten zu müssen.

Unwirksame Gesetze

Wie problematisch es in manchen Ländern ist, bestehende Umweltgesetzgebungen tatsächlich durchzusetzen, zeigt eine aktuelle Studie, die die Situation des Bergbaus in den G-20-Staaten analysiert hat. Interessant sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse für die lateinamerikanischen G-20-Staaten Argentinien, Brasilien und Mexiko. Zwar bezieht sich die Studie auf den Bergbau an Land, doch zeigt sie exemplarisch Problemkreise auf, die ähnlich für den künftigen Meeresbergbau zu erwarten sind. In allen 3 Ländern gibt es klare Vorschriften und Umweltstandards, doch verhindern gleich mehrere Faktoren, dass diese zuverlässig eingehalten werden:

- Den staatlichen Institutionen, die den Bergbau überprüfen sollen, fehlt es an Personal beziehungsweise Fachkräften und finanziellen Mitteln. Daher finden meist keine Begehungen und Überprüfungen der Minen vor Ort statt. In der Regel werden lediglich Anträge und Unterlagen überprüft.

- Die staatlichen Institutionen, die den Bergbau überprüfen sollen, befinden sich räumlich oder administrativ zu nah an den politischen Entscheidern. In manchen Fällen liegen die Büros der Prüfer direkt in den Regierungsämtern der Bundesstaaten. Dadurch können Politiker Einfluss auf die Prüfer nehmen.
- Selbst wenn die staatlichen Überwachungsbehörden unabhängig arbeiten können, werden Bedenken oftmals nicht gehört. Kritische Ergebnisse werden von entscheidungsbefugten Behörden wie etwa Bergbaubehörden nicht ernst genommen oder ignoriert.
- Es gibt kaum Qualitätsstandards oder Zertifizierungen für Gutachterbüros, die Umweltverträglichkeitsprüfungen anfertigen. Damit ist es Industrieunternehmen leicht möglich, Gefälligkeitsgutachten anfertigen zu lassen, die die negativen Auswirkungen des Bergbaus verschleiern.

Kritiker merken an, dass Umweltschäden, die beim Meeresbergbau auftreten könnten, möglicherweise unentdeckt bleiben oder verschwiegen werden. Beim Bergbau an Land gab es in der Vergangenheit häufig offene Konflikte zwischen der Bevölkerung und den Industrieunter-

nehmen beziehungsweise den staatlichen Behörden. Die Umweltzerstörung kam dadurch ans Licht. Der Meeresbergbau hingegen findet in großer Tiefe und damit quasi im Verborgenen statt.

Dem guten Beispiel folgen?

Nicht alle teilen diese Bedenken. Nach Ansicht einiger Seerechtler legt die ISA mit ihren Regelwerken für den Meeresbergbau allgemeingültige Best-Practice-Standards vor. Dies sind zwar keine verbindlichen Vorgaben für nationale Regelungen über Tiefseebergbau auf dem Kontinentalsockel. Dennoch stellen die Instrumente der ISA ein Musterbeispiel dar, mit dem sich die Küstenstaaten zumindest auseinandersetzen müssen. Mehr noch: Sollte sich herausstellen, dass ein Staat im Bereich seines Festlandssockels massive Umweltzerstörungen verursacht, könnte er vor einem internationalen Gericht wie etwa dem Internationalen Seegerichtshof verklagt werden – beispielsweise durch Nachbarstaaten, deren Gewässer verschmutzt worden sind.

Sowohl Kobaltkrusten als auch Massivsulfide finden sich vor allem im Bereich des Festlandssockels von Inselstaaten, die keine eigene Bergbauindustrie haben. Hier werden künftig internationale Bergbauunternehmen auf Basis von Verträgen tätig sein. Auch diese Unternehmen dürften kaum ein Interesse daran haben, die Meeresumwelt im Bereich des staatlichen Festlandssockels zu zerstören. Denn sollte ein solches Unternehmen in Zukunft auch Gebiete auf dem internationalen Tiefseeboden abbauen wollen, könnte die ISA ihm mangels Vertrauen die Lizenz verweigern. Damit gingen dem Unternehmen profitable Meeresgebiete verloren.

Aus Sicht einiger Seerechtler kommt hinzu, dass international tätige Bergbauunternehmen keineswegs unzuverlässige Staaten mit laxen Vorschriften als Abbaugbiet bevorzugen könnten. Denn die Erfahrung zeigt, dass die Kooperation mit solchen Staaten für die Unternehmen durchaus problematisch sein kann. Ausgehandelte Verträge werden nicht immer eingehalten. In politisch instabilen Regionen besteht zudem das Risiko, dass die Verträge nach einer politischen Wende von den neuen

4.9 > Das Ende eines Tankers ist meist der Beginn einer Ölkatastrophe. Im November 2002 sank die „Prestige“ vor der spanischen Nordwestküste. Rund 60 000 Tonnen Öl liefen aus und verschmutzten fast 3000 Kilometer der französischen und spanischen Küste.



Regierungen und Machthabern aufgekündigt werden und Investitionen verloren gehen können. Ein sehr viel höheres Maß an Rechtssicherheit bietet der Meeresbergbau im internationalen Gebiet, der durch Lizenzen der ISA mit verlässlichen Vertragslaufzeiten und festen Vereinbarungen klar geregelt ist.

Lassen sich Ölkatastrophen künftig vermeiden?

Noch ist der Meeresbergbau eine Zukunftsvision. Die Offshore-Ölförderung hingegen ist eine längst etablierte Industrie, die jedes Jahr Milliarden Gewinne erzeugt. Anders als beim Meeresbergbau aber sind die Sicherheits- und Umweltstandards nicht vor der Ausbeutung der Ressourcen, sondern erst im Laufe der Zeit entwickelt worden – in der Regel als Reaktion auf Unfälle oder größere Ölverschmutzungen. Gemäß SRÜ verfügen heute die meisten Staaten über Umweltgesetze und Regeln für die Offshore-Ölproduktion, dennoch ereignen sich Unfälle und Verschmutzungen. Für die Zukunft wird befürchtet, dass sich durch den Trend zu immer größeren Bohrtiefen die Zahl großer Ölunfälle erhöht, die sich wie bei der „Deepwater Horizon“ kaum beherrschen lassen.

Seit Langem wird daher darüber nachgedacht, wie man die Situation verbessern könnte. Dabei geht es vor allem um 2 Aspekte: erstens um die Frage, wie man Unfälle vermeiden und die Umwelt schützen kann, und zweitens, wer bei einem Unfall haftet. Folgende Lösungen schlagen Fachleute vor:

- verbesserte Sicherheitsstandards und strengere Kontrollen für den Betrieb von Bohr- und Förderinseln;
- klar definierte Haftung für den Fall eines Unfalls;
- Schaffung von Fonds, aus denen bei einem größeren Ölunfall Aufräumarbeiten bezahlt und Betroffene schnell und unbürokratisch entschädigt werden.

Intensiv diskutiert wird derzeit vor allem die Haftungsfrage. Die Öffentlichkeit schaut bei einem Unglücksfall meist auf die Betreiber der Anlagen. In der Regel wird das damit begründet, dass diese die nationalen Sicherheits- und Umweltstandards nicht eingehalten haben. Die Folge sind



oft jahrelange Rechtsstreitigkeiten. Die Geschädigten erhalten lange kein Geld. Doch auch die Staaten, in deren Einflussbereich die Anlagen stehen, sind in der Pflicht.

Die Situation ist noch komplizierter, wenn bei einem Unglück auch die Gewässer von Nachbarstaaten betroffen sind. Ein Beispiel ist der Brand der „Montara“-Bohrinsel nördlich von Australien in der Timorsee, der sich 2009 ereignete und sehr dem Fall der „Deepwater Horizon“ ähnelte. Dabei liefen zwischen 5000 und 10 000 Tonnen Öl aus, die die Fanggründe indonesischer Fischer verseuchten. Australien, in dessen AWZ die „Montara“-Plattform stand, weigerte sich, Entschädigungen zu zahlen. Es stellt sich also die Frage, wie man die Haftung eines Staates beziehungsweise die Entschädigung künftig besser regeln kann.

Entschädigungsgarantie bei Tankerunfällen

Die Situation wäre deutlich einfacher, wenn es international einheitliche und anerkannte Haftungsregeln gäbe, nach denen Betroffene entschädigt werden. Ein solches internationales Haftungsregime, das für alle Staaten bindend ist, wäre nicht nur für die Ölförderung, sondern auch für alle anderen „höchst gefährlichen Tätigkeiten“ in der AWZ beziehungsweise auf dem Festlandsockel sinnvoll. Mit dem Terminus bezeichnen Juristen Tätigkeiten, die zwar nicht verboten sind, bei denen sich aber Unfälle mit schweren, vor allem grenzüberschreitenden Schäden

4.10 > Der Betrieb von Atomkraftwerken wie dem in Onagawa, das 80 Kilometer nördlich von Fukushima an der japanischen Ostküste steht, wird von Juristen als „höchst gefährliche Tätigkeit“ bezeichnet, da Unfälle in solchen Industrieanlagen weitreichende Konsequenzen haben können.

Das schmutzige Ölgeschäft in Westafrika

Wie schlecht die Ölindustrie heute in manchen Staaten kontrolliert und reguliert wird, macht die Situation an der afrikanischen Atlantikküste zwischen Angola und der Elfenbeinküste deutlich. Vor allem in Angola und Nigeria gibt es große Ölvorkommen. Doch beide Staaten haben darin versagt, aus den Gewinnen der Ölindustrie Wohlstand für alle zu generieren. Geradezu katastrophal ist die Situation in Nigeria, wo durch die Ölförderung im Mündungsdelta des Nigers bis heute bewaffnete Konflikte geschürt und Feuchtgebiete, Mangrovenwälder und die Lebensräume Tausender Menschen verschmutzt werden. Ein Grund für das Debakel ist, dass die nigerianische Regierung die Gewinne aus dem Ölgeschäft nicht gerecht verteilt. Sie handelt mit den multinationalen Ölkonzernen Kooperationsverträge und Förderlizenzen aus und erhält daraus Einnahmen in Höhe von vielen Milliarden Dollar jährlich. Obwohl ein Verteilungsschlüssel existiert, nach dem die Gewinne auf den Bundeshaushalt, die Landesregierungen und die lokalen Verwaltungen aufgeteilt werden sollen, fließt kaum Geld in die Förderregionen zurück. Fachleute führen das auf ein hohes Maß an Korruption auf hoher Verwaltungsebene zurück. Hinzu kommt, dass die Ländereien, auf denen Öl gefunden wird, nach dem Landnutzungsgesetz von 1978 automatisch den Bundesbehörden übereignet werden. Die Gemeinden oder Privatbesitzer werden in der Regel nicht entschädigt. Diese Ungerechtigkeit führt unter anderem dazu, dass Pipelines illegal angezapft werden und das Öl in großen Mengen gebunkert und ins Ausland, insbesondere in die Nachbarländer Benin, Elfenbeinküste und Senegal, verkauft wird. Durch das Anzapfen der Pipelines wurden zudem große Gebiete im Nigerdelta verschmutzt. Fachleute schätzen die Einnahmen aus dem illegalen Geschäft auf rund 1 Milliarde US-Dollar pro Jahr.

Aktuell kämpfen verschiedene Rebellengruppen um Einfluss im illegalen Ölgeschäft. Schwierig ist die Situation auch, weil es in Nigeria schon vor dem in den 1970er Jahren beginnenden Ölboom Konflikte zwischen verschiedenen Bevölkerungsgruppen gab, die sogar zu Bürgerkriegen führten. Diese Konflikte wurden angeheizt, indem Politiker die Gewinne aus dem Öl Gruppen zukommen ließen, die ihnen politisch gewogen waren. Zum Teil wurden Konflikte zusätzlich durch Waffenlieferungen von Politikern an Rebellengruppen verschärft.

Der Ölreichtum hat in Nigeria zu einem Krieg ums Öl geführt. Sind die multinationalen Konzerne auch nicht direkt an Kriegshandlungen beteiligt, so ist eine Ölförderung in politisch derart instabilen Regionen grundsätzlich fragwürdig. Selbst das soziale Engagement der Konzerne hat in Nigeria oftmals zu neuen Konflikten geführt. Zwar kann man den Konzernen zugutehalten, dass sie aus eigenem Antrieb durch finanzielle Unterstützung und soziales Engagement versuchen, die Lebenssituation der Bevölkerung in den Förderregionen zu verbessern. Doch kam es in der Vergangenheit immer wieder zu Auseinandersetzungen zwischen Gemeinden, die gefördert wurden, und Nachbarorten, die leer ausgin-

gen. Dass die Ölkonzerne Mitverantwortung für das tragen, was in den Förderländern geschieht, wurde 2013 deutlich, als sich die britisch-niederländische Firma Shell vor einem Gericht in Den Haag für Umweltschäden im Nigerdelta verantworten musste. In den Jahren 2004 bis 2007 hatte es im Nigerdelta mehrfach Anschläge auf Pipelines gegeben. Aus den Lecks traten große Mengen Öl aus, das mehrere Dörfer sowie Äcker und Fischfanggebiete verschmutzte. Bauern, Fischer und eine niederländische Umweltorganisation gingen deshalb vor Gericht. Dort wurden insgesamt 5 Fälle verhandelt. Dem Konzern warf man vor, seine Pipelines nicht ausreichend überwacht zu haben. In einem Fall sprach das Gericht die nigerianische Niederlassung des Konzerns schuldig: Das Unternehmen habe seine Sorgfaltspflicht durch besondere Nachlässigkeit verletzt. So sei es dadurch überhaupt erst möglich geworden, dass eine Leitung in den Jahren 2006 und 2007 durch einfaches Öffnen eines Ventils mit einem Schraubenschlüssel sabotiert wurde. In den anderen 4 Fällen hingegen treffe den Konzern keine Schuld, weil die Pipelines unterirdisch verlegt und ausreichend gesichert waren.

Die verhandelten Fälle stehen stellvertretend für viele andere. Laut einer Umweltstudie im Auftrag des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) gibt es im Nigerdelta massive Umweltschäden. Gutachter hatten Gebiete entlang von Pipelines untersucht, außerdem Ölförderbrunnen und Orte, wo sich Pipelinelecks ereignet hatten. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die Verschmutzungen weitreichend sind. Problematisch ist vor allem die Verschmutzung der Böden und Gewässer mit giftigen Kohlenwasserstoffen. An 49 Messpunkten sind die Ölbestandteile bis zu 5 Meter tief in den Boden eingedrungen. An 41 Messpunkten haben sie bereits das Grundwasser erreicht. Darüber hinaus ist in der Region der Fischfang stark zurückgegangen, da sich die Fischmenge vermutlich aufgrund der Giftstoffe verringert hat.

Rund 15 Prozent des Öls werden in Nigeria nicht an Land, sondern im Offshore-Bereich vor der Küste gewonnen. Dieser Anteil nimmt zu. Zwar ist die Förderung im Meer teurer, doch gilt sie als sicherer, da die Bohrinselfür Rebellen schlechter erreichbar und damit vor Anschlägen relativ gut geschützt sind. Allerdings kam es auch hier zu Angriffen. Im Jahr 2008 überfielen Rebellen einer der größten militanten Gruppen Nigerias, der Bewegung für die Emanzipation des Nigerdeltas (Movement for the Emancipation of the Niger Delta, MEND), eine 120 Kilometer vor der Küste liegende Ölplattform und demonstrierten damit Stärke auch auf See. Ungeachtet dessen könnte der Ausbau der Offshore-Ölindustrie nach Ansicht von Sozialwissenschaftlern in Nigeria dazu beitragen, die Missstände in der Region und das Konfliktpotenzial zu verringern, da die Menschen anders als bei der Ölförderung an Land nicht direkt betroffen sind und die Verschmutzung von Böden und Trinkwasser ausbleibt.



4.11 > Aus Pipelines gestohlenes Öl wird im Nigerdelta, wie hier am Fluss Imo, in illegalen Raffinerien verarbeitet, die das Wasser zusätzlich verschmutzen.

Anders als in Nigeria wird in Angola Öl ausschließlich im Meer gefördert. Auch sind die Missstände dort etwas anderer Natur. Am Ölreichtum partizipieren aber auch in Angola nur wenige Menschen, und die Unterschiede zwischen Arm und Reich sind groß. Die wichtigste Ölförderregion sind die Küstengewässer vor der angolanischen Provinz Cabinda, einer Exklave im Nachbarland Kongo. Dennoch gehört Cabinda zu den ärmsten Regionen des Landes. Abgesehen von wenigen Straßen in Küstennähe gibt es kaum Infrastruktur. Die angolanische Hauptstadt Luanda hingegen ist die teuerste Stadt der Welt. In keiner anderen Metropole sind die Mieten und Lebenshaltungskosten so hoch wie hier. Angola ist heute der größte Ölproduzent südlich der Sahara. Verträge werden zwischen der hiesigen staatlichen Ölgesellschaft Sonangol und internationalen Konzernen ausgehandelt. In diesen Produktionsvereinbarungen werden Verteilungsschlüssel festgelegt, nach denen sich das Gastland und die internationalen Konzerne die Profite aus der Erdölproduktion teilen. Wie groß diese tatsächlich sind, ist allerdings weitgehend unklar, weil nur unvollständige, schlecht verständliche oder inkonsistente Daten veröffentlicht werden. Wie der extreme Unterschied zwischen Armut und Reichtum in Angola zeigt, kommen die Profite dort nur der Elite zugute.

Ogbleich Fachleute Angola dafür loben, dass es strenge Anti-Korruptionsgesetze eingeführt hat und die Korruption auch öffentlich bekämpft, ist dennoch davon auszugehen, dass Teile der Ölgewinne auf hoher administrativer Ebene unterschlagen werden. Das liegt unter anderem daran, dass Sonangol nicht von unabhängigen Behörden kontrolliert oder reguliert wird. Angolanische und internationale Nichtregierungsorganisationen fordern daher mehr Transparenz und öffentliche Diskussionen – mit dem Ziel, eine gerechtere Verteilung der Gewinne zu erreichen.

Umweltverschmutzungen in einem Ausmaß wie in Nigeria gibt es in Angola zwar nicht, aber 1991 explodierte vor der Küste der Öltanker „ABT Summer“. Rund 250 000 Tonnen Öl liefen aus und verschmutzten die Küste. Seitdem gab es glücklicherweise keine größeren Ölunfälle. Angolanische Nichtregierungsorganisationen beklagen aber die permanente Verschmutzung der Gewässer durch Öl, das mit Abwässern von den Bohrseln ins Meer gelangt. Sie schätzen, dass pro Jahr mehr als 10 kleinere Ölverschmutzungen auftreten.

Umstritten ist, ob die Abnahme der Fischbestände vor der Küste auf diese Ölverschmutzungen zurückzuführen ist oder die Überfischung eine größere Rolle spielt.

ereignen können – etwa beim Betrieb von Atomkraftwerken, Chemieanlagen oder eben von Ölbohrinseln. Noch aber ist nicht abzusehen, dass sich die Staaten auf gemeinsame Spielregeln einigen.

Dabei ist so etwas durchaus möglich. Schon 1969 wurde für den Tankerverkehr die Konvention zur Haftung bei Schäden durch Ölunfälle (International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage) verabschiedet, die 1992 noch einmal aktualisiert wurde. Mit dieser Konvention gibt es heute einen verbindlichen internationalen Rechtsrahmen für Zivilklagen im Tankerverkehr, der vor allem das Ziel hat, Betroffene nach Tankerhavarien schnell und unbürokratisch zu entschädigen. Verhandelt wird in der Nation, in der sich der Unfall ereignet hat. Die Stärke dieser internationalen Haftungskonvention, die von 109 Staaten ratifiziert wurde, besteht darin, dass nach einheitlichen Regeln verhandelt wird. Oftmals ziehen sich internationale Zivilklagen in die Länge, weil es große Unterschiede zwischen den Rechtssystemen verschiedener Staaten gibt. So gibt es verschiedene Gerichtssprachen, andere Verfahrensarten oder andere Fristen wie zum Beispiel Verjährungsfristen. Zudem kann sich ein Rechtsstreit durch Gutachten und Gegengutachten in die Länge ziehen. Die Folge: Die Betroffenen werden gar nicht entschädigt.

Oft drehen sich Streitigkeiten um die Schuldfrage, die Frage, wer für einen Schaden verantwortlich ist. Strittig ist häufig auch, ob ein Unfall durch anderes Verhalten hätte abgewendet werden können. Dank der Konvention passiert das bei Tankerunfällen heute nicht mehr, weil grundsätzlich der Reeder dazu verpflichtet ist, für Schäden durch eine Tankerhavarie aufzukommen. Diese Regelung gilt immer, unabhängig davon, ob der Reeder den Schaden verschuldet hat oder hätte abwenden können. Nur in ganz wenigen Fällen wie zum Beispiel Bürgerkriegen oder außergewöhnlichen und extremen Naturkatastrophen wird der Reeder entlastet.

Entschädigungszahlungen aus dem großen Topf

Da ein Reeder damit bei einem Unfall stets weitreichend haften muss, ist er gemäß Konvention verpflichtet, sich gegen Unfälle zu versichern. Laut Konvention werden Schäden im ersten Schritt aus der Versicherung des Ree-

ders beglichen. Übersteigen die Schäden die Versicherungssumme, springt ein Fonds ein, der Schäden in einem mehrstufigen Verfahren von bis zu etwa 1 Milliarde Dollar trägt. Dieser International Oil Pollution Compensation Funds (IOPC, Internationaler Fonds für die Kompensation von Ölverschmutzungen) wurde mit der Konvention ins Leben gerufen. Er garantiert, dass die Betroffenen tatsächlich ihr Geld erhalten. Aus dem Fonds werden Kosten für die Aufräum- und Reinigungsarbeiten nach Tankerhavarien gezahlt sowie Entschädigungszahlungen an Fischer oder die Tourismusindustrie geleistet. In den Fonds zahlen die Erdöl importierenden Nationen ein, die die Beiträge wiederum von der Erdöl verarbeitenden Industrie in ihrem Land einfordern. Die Beitragssumme bemisst sich nach der Menge des importierten Öls.

Der Charme des Fonds besteht darin, dass die Zahlungen direkt nach einem Unglück unabhängig von der Schuldfrage geleistet werden, ganz gleich, ob der Tankerkapitän einen Fehler gemacht oder der Reeder das Schiff nicht ausreichend gewartet hat. Das ist vor allem auch dann wichtig, wenn sich die Zahlung der Versicherungssumme durch eventuelle Rechtstreitigkeiten verzögert. Die Betroffenen werden dann schnell und unbürokratisch aus dem Fonds entschädigt. In einigen Fällen hat der Fonds in der Vergangenheit direkt mit Betroffenen verhandelt. Damit wird vermieden, dass Geschädigte lange auf ihr Geld warten oder sich erst durch mehrere Instanzen klagen müssen. Hat der Fonds die Opfer entschädigt, kann er sich dann seinerseits das Geld von dem Reeder oder dessen Versicherung zurückholen. Die Konvention und der Fonds sind ein bislang einmaliges, unschlagbares Doppel: Die Konvention schafft Rechtssicherheit; der Fonds sorgt dafür, dass im Schadensfall immer entschädigt wird.

Kein Fonds für Bohrsinseln

Die Konvention und der IOPC-Fonds wurden in enger Abstimmung mit der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organisation, IMO) entwickelt und beziehen sich damit ausschließlich auf Schiffe, nicht aber auf feststehende Anlagen wie etwa Bohrsinseln oder ankernde Halbtaucherplattformen. Obwohl grundsätzlich auch bei diesen ein solches Modell denkbar ist, zeichnet sich nicht ab, dass die Ölindustrie



4.12 > Bei der Havarie des Tankers „Hebei Spirit“ vor Südkorea im Dezember 2007 wurden etliche Kilometer der Küste verschmutzt. Die Behörden mobilisierten 12 000 Helfer, die das Öl mitunter mit einfachster Ausrüstung wie Eimer und Schaufel zu beseitigen versuchten. Die Kosten solcher Reinigungsarbeiten sind immens.

ein Interesse daran hat. Bis dato sind Ölfirmen nur über allgemeine Haftpflichtversicherungen mit bis zu 1,5 Milliarden US-Dollar abgesichert. Einzelne Bohrvorhaben sind gar nicht versicherbar. Wie die Explosion der „Deepwater Horizon“ aber zeigte, kann eine solche allgemeine Haftpflichtversicherung die Schäden eines großen Ölunfalls nicht annähernd abdecken.

Dennoch lehnten die Ölunternehmen ein über mehrere Jahre ausgearbeitetes Versicherungsmodell von Rückversicherern ab, das künftig einzelne Bohrvorhaben und mögliche Umweltschäden und Folgekosten bei einem Unfall bis zu einer Schadenssumme von 10 bis 20 Milliarden Dollar absichern sollte. Fachleute sehen den Grund für die ablehnende Haltung darin, dass die Ölunternehmen schlicht so reich sind, dass sie eine Versicherung in dieser Größenordnung für überflüssig halten. Entsprechend gering ist derzeit das Interesse an einer Konvention und einem Fonds nach dem Haftungsmodell für Tankerunfälle. Das ist bedauerlich, weil damit künftig nach Unglücken auf Ölbohrinseln nur noch selten Rechtsstreitigkeiten oder Prozesse nötig wären.

In jedem Fall schuldig

Seerechtler halten eine umfassende Form der Zivilhaftung, wie es sie heute für das Tankergeschäft gibt, für ideal. Bis es Haftungskonventionen für andere Arten „höchst gefährlicher Tätigkeiten“ und damit einen international einheitlichen Rechtsrahmen für die Zivilhaftung gibt, dürften jedoch noch viele Jahre vergehen. Eine Übergangslösung könnte eine Neuregelung der Staatenhaftung sein, bei der nicht ein Privatunternehmen, sondern stets der Staat für die Schäden aufgrund einer „höchst gefährlichen Tätigkeit“ aufkommt. Heutzutage haftet ein Staat nur dann, wenn er gegen Regeln verstoßen hat – beispielsweise weil Gesetze oder Vorschriften nicht ausreichend sind oder er seiner Pflicht zur Kontrolle von Chemiewerken oder Bohrsinseln nicht nachgekommen ist.

Um jahrelange Rechtsstreitigkeiten um Haftungsfragen zu vermeiden, könnte die von Juristen so bezeichnete „verschuldensunabhängige Staatenhaftung“ im Fall „höchst gefährlicher Tätigkeiten“ eine probate Lösung sein. In einem solchen Fall haftet ein Staat immer, ganz gleich, ob der Betreiber der Anlage Schuld hat oder nicht.

Eine solche Situation kennt man aus dem Alltag. Beißt ein Hund ein Kind, haftet der Hundebesitzer in jedem Fall – unabhängig davon, ob er seinen Hund gut erzogen und zur Hundeschule geschickt hat, also unabhängig davon, ob er Schuld hat oder nicht. Er haftet „verschuldensunabhängig“. Eine solche Haftung wäre auch beim Betrieb von Bohrsinseln gerechtfertigt, immerhin gestattet der Staat den Betrieb einer „höchst gefährlichen Tätigkeit“. Zudem vergeben Staaten in vielen Fällen Lizenzen an Unternehmen, erhalten dafür regelmäßige Lizenzgebühren in großer Höhe und sind so direkt am Gewinn des Unternehmens beteiligt. Gelänge es, eine solche Staatenhaftung durchzusetzen, ließen sich langwierige Gerichtsprozesse und Streitigkeiten wie im Fall der „Montara“-Bohrinsel zwischen Australien und Indonesien vermeiden.

Völkerrechtlich verankert ist bislang „nur“ die Idee der Staatenhaftung im Fall einer großflächigen und grenzüberschreitenden Verschmutzung: also die Haftung für einen „schuldhaften“ Regelverstoß. Das Prinzip ist auf höchster juristischer Ebene im Völkerrecht beziehungsweise **Völkergewohnheitsrecht** verankert. Es wurde bereits vor rund 70 Jahren in die internationalen Regelwerke aufgenommen. Dieser Entscheidung war der Trail-Smelter-Fall in den 1920er Jahren vorausgegangen, die erste große grenzüberschreitende Umweltkatastrophe. Abgase der kanadischen Trail-Smelter-Blei- und Zinkhütte hatten zunächst die Felder kanadischer Bauern vergiftet und die Ernten vernichtet. Der kanadische Betreiber reagierte damit, hohe Schornsteine zu bauen, wodurch die giftigen Abgase weiter weg getragen wurden. Damit gelangte das Gift fortan bis ins Nachbarland USA und vernichtete die Ernten US-amerikanischer Bauern. Zwar wurden die kanadischen Bauern recht schnell entschädigt. Die Anwälte der US-Bauern und der kanadische Konzern aber wurden sich nicht über Entschädigungszahlungen einig. Deshalb verwies man den Fall an die International Joint Commission (IJC), ein binationales Rechtsgremium, das 1909 gegründet worden war, um Verträge über die Nutzung der Grenzgewässer zwischen den USA und Kanada auszuhandeln. Das Schiedsverfahren zog sich lange hin, weil die Parteien darüber stritten, inwieweit die Ernteauffälle tatsächlich auf die Gifte zurückzuführen waren. Es endete erst 1941. Der Konzern entschädigte die US-Bauern mit einer relativ geringen Summe.



4.13 > Die Schmelzhütte in Trail in der kanadischen Provinz British Columbia wurde durch einen Rechtsstreit zwischen Kanada und den USA berühmt. Es dauerte Jahre, bis US-Bauern für verdorbene Ernten und vergiftete Böden entschädigt wurden.

Weltraumrecht für irdische Probleme?

Eine „verschuldensunabhängige Staatenhaftung“ ist bis heute nicht verwirklicht worden. Hinzu kommt: Weil ein Staat Immunität genießt, kann ein Bürger oder betroffener Staat nicht einmal berechnete Haftungsansprüche gerichtlich geltend machen, geschweige denn, sie vollstrecken. Das Völkerrecht und das Völkergewohnheitsrecht lassen nämlich offen, wie das Recht im Schadensfall durchgesetzt werden soll. So ist unklar, welche Institution hier Recht sprechen oder die Strafe festlegen soll. Damit stellt sich die Frage, ob und wie ein Staat einen anderen eigentlich verklagen oder zur Entschädigungszahlung zwingen kann. In Ermangelung klarer Regeln einigen sich die Staaten meist auf diplomatischem Wege. Dies geschieht oft unter Ausschluss der Öffentlichkeit und ohne dass die Geschädigten darauf Einfluss nehmen können. So wurde auch Mexiko nach dem Untergang der „Deepwater Horizon“ im Anschluss an Verhandlungen mit US-Behörden auf diplomatischem Wege für die finanziellen Verluste aufgrund der Ölverschmutzung entschädigt. Bis heute gibt es nur ein einziges Beispiel dafür, dass international tatsächlich eine „verschuldensunabhängige Haftung“ von Staaten durchgesetzt werden konnte: im Weltraumrecht. So muss

ein Staat gemäß dem Übereinkommen zur internationalen Haftung für durch Raumfahrzeuge verursachte Schäden (Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects) von 1972 haften, wenn ein Raumfahrzeug über dem Territorium eines anderen Staates abstürzt. In der Regel haftet der Staat, von dessen Territorium das Raumfahrzeug gestartet ist.

Für alle anderen Fälle grenzüberschreitender Verschmutzungen oder Zerstörungen bleibt es schwierig. Ohne eine einheitliche internationale Regelung über die zivile Haftung für besonders risikoreiche Tätigkeiten im Tiefseebergbau oder in der Offshore-Ölförderung gibt es bis dato nur 2 Möglichkeiten, Recht einzuklagen oder Entschädigungen zu erhalten: die Klage vor dem Gericht eines fremden Staates oder eine gütliche Einigung über eine Entschädigungszahlung zwischen Heimatstaat und Verursacherstaat. Beides aber endet bis heute meist in einem zähen Ringen.

Vermeidung ist die beste Strategie

Eine klare Haftungsregelung und daraus resultierende Entschädigungszahlungen sind wichtig, damit Schäden beglichen werden können. Noch wichtiger ist es allerdings,

Umweltverschmutzungen gänzlich zu vermeiden. Dafür sind hohe technische Sicherheitsstandards erforderlich. Diesbezüglich kann die Reglementierung des Öltankerverkehrs als ein gutes Beispiel dienen. Der Einsatz vorgeschriebener doppelter Bordwände verhindert, dass Tanker bei einem Unfall sofort leckschlagen wie in den 1960er und 1970er Jahren. So konnten in mehreren Fällen große Unglücke und Verschmutzungen vermieden werden.

Auch politisch setzte man Maßstäbe, indem bestimmte Gebiete durch Abkommen ganz für den Tankerverkehr gesperrt wurden. Dass gerade in dieser Branche so hohe Standards gesetzt wurden, hat mehrere Gründe. Zum einen sind Tankerunfälle sehr medienwirksam. Der öffentliche Druck auf die politischen Entscheider nahm damit von Ölunfall zu Ölunfall deutlich zu. Zudem ist bei einem Ölunfall das Ursache-Wirkungs-Prinzip sehr einfach. Setzt ein Kapitän ein Schiff auf Grund, ist meist schnell geklärt, wie es dazu kommen konnte. Bei der Explosion einer Bohrinselformation, auf der viele Menschen parallel an verschiedenen Stellen arbeiten, ist die Ursachenforschung schwieriger. Denn bei dem Betrieb einer solchen Plattform gibt es viele sicherheitskritische Tätigkeiten, die analysiert und verbessert werden können.

Genau das ist wiederum ein Argument für eine Haftungsregelung wie bei Tankerunfällen. Mit einer entsprechenden Haftungskonvention würden auch die Betreiber der Anlagen beziehungsweise die Erdölproduzenten verpflichtet, Abgaben in einen Fonds einzuzahlen. Daraus würden Geschädigte wie beim IOPC zügig und noch vor der komplexen Klärung der Ursache oder Schuldfrage entschädigt. Die Schaffung einer entsprechenden Konvention mitsamt Fonds wäre zudem ein wesentlicher Schritt zu einer neuen Sicherheitskultur im Offshore-Geschäft, wie sie im Tankerverkehr längst üblich ist.

Den Verbrauch reduzieren

Umweltschäden durch industrielle Tätigkeit wird es wohl bedauerlicherweise immer geben. Es kommt allerdings darauf an, diese Schäden so klein wie möglich zu halten. Solange die Menschheit Rohstoffe verbraucht, werden bei deren Abbau auch Lebensräume beeinträchtigt. Die entscheidende Frage ist, wie es gelingen kann, den Verbrauch zu reduzieren.

Ein Weg ist es, Recycling-Technologien zu entwickeln und entsprechende Wertstoffketten aufzubauen. Selbst in etablierten Wiederverwertungsindustrien besteht heute noch Optimierungsbedarf, etwa beim Aluminium, von dem gegenwärtig nur gut ein Drittel recycelt wird.

Weltweit arbeiten derzeit eine Reihe von Unternehmen intensiv an neuen Verfahren zur Rückgewinnung von Sondermetallen wie etwa Seltenerdmetallen aus Computern und Smartphones. Gerade diese technischen Geräte bieten große Recyclingpotenziale, da es von ihnen große Mengen gibt und sie reich an Sondermetallen sind und kurze Lebenszyklen haben. Damit würden die Metalle der Rohstoffwirtschaft schnell wieder zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus gibt es heute viele umweltfreundliche und sparsame Technologien. Solar- und Windenergieanlagen oder sparsame Autoantriebe sind längst entwickelt. Auch durch Verzicht ließe sich etwas erreichen. Rohstoffe, die der Mensch nicht verbraucht, müssen nicht abgebaut werden. Vor allem die westlichen Industrienationen konsumieren schon seit Langem sehr viel. Die Wandlung der Industrienationen in Konsumgesellschaften begann nach dem Zweiten Weltkrieg. Philosophen und Gesellschaftswissenschaftler sprechen vom 1950er-Syndrom – der Zeit des stark steigenden Lebensstandards zwischen 1949 und 1966, in der der Energieverbrauch erheblich zunahm. Energie und Rohstoffe erschienen damals unerschöpflich und waren billig.

Dazu trug die Entdeckung der großen Ölfelder im Nahen Osten und die Entwicklung der Atomenergie bei. Öl, so schien es, würde Jahrhunderte reichen. Auch Lebensmittel verbilligten sich durch intensive Landwirtschaft und Massentierhaltung, was letztlich nur mit einem hohen Einsatz an Maschinen und wiederum Energie möglich war. Diese Ära, sagen Forscher, war eine historische Ausnahmeerscheinung und keineswegs der Normalzustand. Das spüren wir heute angesichts der Verknappung von Rohstoffen bei gleichzeitig rapide wachsender Weltbevölkerung.

Es gibt nicht die eine, allumfassende Lösung, um den Rohstoffverbrauch zu bremsen. Es braucht viele Maßnahmen auf politischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Ebene. Aber es gilt auch die alte Weisheit, dass jeder seinen Teil dazu beitragen muss.

CONCLUSIO

Ist eine sichere und gerechte industrielle Meeresnutzung möglich?

Bodenschätze im Meer werden bislang ausschließlich in den Küstengebieten von Nationalstaaten gewonnen. Das wird sich ändern. Derzeit deutet vieles darauf hin, dass 2016 mit der Ernte von Manganknollen der Bergbau am Meeresboden in den internationalen Gewässern beginnt. Damit wird ein neues Kapitel der industriellen Nutzung von Meeresressourcen aufgeschlagen, denn die Rohstoffe im internationalen Gebiet gehören nicht einem Staat allein, sondern sind gemeinsames Erbe der Menschheit. Sie sollen nach dem Seerechtsübereinkommen (SRÜ) allen Menschen zugutekommen.

Das SRÜ ist das größte Regelwerk der Menschheit. Es wurde von 165 Staaten und der Europäischen Union ratifiziert und trat 1994 in Kraft. Zugleich wurde die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) in Jamaika gegründet. Diese UN-Behörde sorgt dafür, dass die Bodenschätze im internationalen Meeresgebiet gerecht verteilt und auch Entwicklungsländer an den Gewinnen beteiligt werden. Staaten, die im internationalen Gebiet Rohstoffe abbauen wollen, müssen bei der ISA eine Lizenz für die Erkundung (Exploration) beantragen. An 25 Staaten hat die ISA bisher Explorationslizenzen vergeben, die klare Regeln und Umweltschutzstandards beinhalten. Teile der erkundeten Gebiete müssen nach Abschluss der Exploration wieder an die ISA abgetreten werden und bleiben für Entwicklungsländer reserviert.

Ein Regelwerk für den Abbau von Meeresrohstoffen wird bis 2016 von der ISA ausgearbeitet, zunächst für Manganknollen, dann für Massivsulfide und Kobaltkrusten. Erst danach kann der Abbau beginnen. Die Arbeit der ISA gilt als vorbildlich, weil erstmals in der Geschichte Regelwerke geschaffen werden, bevor es an die Ausbeutung von Rohstoffen geht. Bemerkenswert ist auch, dass die ISA inner-

halb der künftigen Abbauflächen Gebiete zum Schutz der Tiefseefauna definiert hat, in denen der Abbau verboten ist. Umweltschützer kritisieren, dass die ISA bis heute gemäß SRÜ keine Meeresschutzgebiete jenseits der Abbaugebiete ausweisen kann. Als für den internationalen Meeresboden zuständige Behörde sei sie dafür aber prädestiniert. Kritiker fordern eine Nachbesserung des SRÜ.

In den Gewässern von Küstenstaaten wiederum gibt es keine einheitlichen Spielregeln für den Meeresbergbau. Zwar ist jeder Staat laut SRÜ verpflichtet, die Meere zu schützen, doch wird vielerorts das Meer durch die Ölförderung oder durch Abwässer von Land stark verschmutzt, wenn Behörden nur lax kontrollieren. Umweltschützer betrachten den Meeresbergbau als weitere Störquelle. Mangelnde Kontrolle ist besonders gefährlich, wenn ein Staat in seinem Einflussbereich „höchst gefährliche Tätigkeiten“ wie den Betrieb von Atomkraftwerken oder Bohrseln im Meer gestattet. Oft sind bei Unfällen Nachbarländer betroffen, sodass es zu internationalen Rechtsstreitigkeiten um Entschädigungszahlungen kommt. Juristen fordern, Staaten bei jeder „höchst gefährlichen Tätigkeit“ verschuldensunabhängig haftbar zu machen, um internationale Gerichtsverfahren zu erleichtern. Heute werden Betroffene mitunter gar nicht oder unzureichend entschädigt. Oft warten sie jahrelang auf ihr Geld. Nur für Tankerunglücke gibt es eine wirkungsvolle Haftungsregelung, die bereits vor Jahren mit der Konvention zur Haftung bei Schäden durch Ölfälle etabliert wurde. Mit der Konvention wurde zugleich ein Haftungsfonds aufgelegt, in den die Erdöl importierenden Länder einzahlen. Gemäß Konvention haftet bei einem Unglück der Reeder unabhängig davon, ob er Schuld hat oder nicht. Übersteigen die Forderungen die Versicherungssumme, springt der Fonds ein und begleicht die Entschädigungsforderungen. Diese Haftungsregelung könnte Vorbild für andere Industrien wie etwa die Offshore-Ölförderung sein.



Der Rohstoffverbrauch der Menschheit ist gewaltig. Wir benötigen Erdöl, um 1 Milliarde Autos und Lastwagen anzutreiben, jährlich rund 20 Millionen Tonnen Kupferrefinade für beispielsweise Stromleitungen oder Elektromotoren und exotische Metalle wie etwa Neodym für viele industrielle Einsatzgebiete. Seit Anfang der 1970er Jahre hat sich der weltweite Energieverbrauch verdoppelt. Mit dem Wachstum der Weltbevölkerung und der Entwicklung der großen Schwellenländer China und Indien wird er sich nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) in Paris bis zum Jahr 2035 nochmals um mehr als ein Drittel erhöhen. So wird das Meer als Rohstoffreservoir zunehmend interessant. Vor allem in der Tiefsee gibt es noch große Mengen an Erdgas, Erdöl und Erzen, und die Aussicht, diese Schätze zu heben, ist verlockend.

Während Erdgas und Kohle noch weit bis über dieses Jahrhundert hinaus in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, ist Erdöl voraussichtlich derjenige fossile Rohstoff, der zuerst knapp wird. Öl ist heute der wichtigste fossile Energieträger weltweit und wird bereits zu einem guten Drittel im Meer gefördert. Die Offshore-Ölindustrie ist also längst etabliert. Wurde zunächst nur in flachen, küstennahen Meeresgebieten gebohrt, so hat die Ölindustrie inzwischen die Tiefsee erobert. Dank neuer geophysikalischer Erkundungsverfahren sind Wissenschaftler heute in der Lage, den Meeresboden und andere Bodenschichten bis in eine Tiefe von 12 Kilometern unter dem Meeresboden nach Gas- und Öllagerstätten abzusuchen. Mithilfe moderner Methoden wurden in den vergangenen Jahren immer wieder neue große Lagerstätten entdeckt oder schon bekannte neu vermessen. Zwischen den Jahren 2007 und 2012 wurden 481 größere Felder, die in Wassertiefen von mehr als 1500 Metern liegen, aufgefunden. Das sind mehr als die Hälfte der insgesamt neu entdeckten größeren Offshore-Felder. Die Tiefseeförderung dürfte also in Zukunft immer wichtiger werden. Interessant ist, dass die neu ausgemachten Offshore-Felder in der Regel 10-mal größer als neu entdeckte Felder an Land sind.

Wie die Explosion der Bohrinself „Deepwater Horizon“ zeigt, ist die Ölförderung in großer Tiefe sehr riskant, weil die Bohrlöcher dort nur mit speziellen Tauchgeräten versorgt werden können und Unfälle deshalb kaum beherrschbar sind. Zu dem Unglück kam es unter ande-

rem, weil Mitarbeiter Messwerte aus dem Bohrloch falsch interpretierten und weil Schutzventile versagten, die das Bohrloch hätten schließen sollen. Eine Ursache ist auch, dass die Zuständigkeiten an Bord nicht klar geregelt waren, was insofern doppelt problematisch ist, als gleichzeitig Fachkräfte mehrerer Subunternehmen an Bord arbeiteten. So konnten Fehler unentdeckt bleiben.

Als Reaktion auf das Unglück im Golf von Mexiko hat die Offshore-Ölindustrie große Schutzhauben entwickelt, sogenannte Capping Stacks, die im Notfall in der Tiefe über ein sprudelndes Bohrloch gestülpt werden können. Mehrere dieser Capping Stacks werden heute jeweils in den großen Ölförderregionen für Notfälle bereitgehalten, etwa am Golf von Mexiko oder an der brasilianischen Küste. Auch das Management an Bord der Bohrinself wurde im Golf von Mexiko neu geregelt. Fortan muss ein Betriebsleiter alle Tätigkeiten der Subunternehmer auf der Insel beaufsichtigen und verantworten.

Vermutlich aber wird das nicht ausreichen, um künftig Unglücke und Schäden in Höhe von vielen Milliarden Euro zu vermeiden. Tragisch ist, dass Geschädigte wie regionale Fischer oder Touristikunternehmer heute oftmals lange auf Entschädigungen warten müssen, weil die Ölkonzerne und der Staat vor Gericht um die Haftung streiten. Sind zusätzlich durch einen Ölunfall auch Nachbarstaaten betroffen, kommt es zu noch komplizierteren Gerichtsverfahren. Um diese zu vermeiden, wäre eine unbürokratische Haftungsregelung von Vorteil, wie es schon für Tankerunfälle gibt. Gemäß einer internationalen Konvention gilt für Tankerunfälle, dass grundsätzlich der Schiffsbetreiber haften und zahlen muss. Übersteigen die Kosten die Versicherungssumme, springt ein internationaler Fonds ein, der schnell und unbürokratisch zahlt. Eine solche Regelung wäre auch für die Offshore-Ölförderung sinnvoll, wird aber von den Ölkonzernen bislang abgelehnt. In die Tankerfonds zahlen die Erdöl importierenden Staaten ein, die die Umlage wiederum von den im jeweiligen Land ansässigen Öl verarbeitenden Industrieunternehmen erhalten.

Generell fragwürdig ist die Ölförderung in politisch instabilen Regionen wie zum Beispiel in einigen westafrikanischen Ländern. Probleme entstehen dadurch, dass die Gewinne aus dem Ölgeschäft ungleich verteilt werden und aufgrund von Korruption nur wenigen zugutekom-

GESAMT-CONCLUSIO

men. Häufig gehen dann gerade die Menschen leer aus, die in den Ölförderregionen leben. In Nigeria zum Beispiel kommt es daher immer wieder zu Konflikten, bei denen bewaffnete Gruppen um die Vorherrschaft im Ölgeschäft kämpfen. Ausgelaufenes Öl aus sabotierten Pipelines und illegal installierten Kleinraffinerien hat dazu geführt, dass weite Teile des Nigerdeltas vergiftet sind. In Angola, der heute wichtigsten Erdölnation südlich der Sahara, gibt es glücklicherweise zwar keine offenen Konflikte, doch werden die Gewinne auch dort ungleich verteilt. In weiten Teilen des Landes sind die Menschen sehr arm. Die Hauptstadt Luanda aber gilt als eine der teuersten Metropolen der Welt.

Eine alternative fossile Energiequelle, die aktuell viel diskutiert wird, sind Methanhydrate. Dabei handelt es sich um feste eisähnliche Verbindungen aus Wasser und dem Erdgasbestandteil Methan. Das für die Bildung der Hydrate erforderliche Methangas steigt aus der Tiefe bis zum Meeresboden auf. Das meiste Methan entsteht in tiefen Sedimentschichten biogen durch bakterielle Zersetzungsprozesse. Ein geringerer Teil stammt aus noch größerer Tiefe und wird im Untergrund durch chemische Umwandlung von Biomasse bei hohen Drücken und Temperaturen thermogen erzeugt. Methanhydrat bildet sich in Wassertiefen von 500 bis 3000 Metern. Dort ist der Wasserdruck ausreichend hoch und das Meerwasser so kalt, dass sich das Methan mit Wasser im Sediment zum Hydrat verfestigen kann. Das Methan ist hier so dicht gepackt, dass 1 Kubikmeter festes Methanhydrat rund 160 Kubikmeter Methangas liefert. Experten schätzen, dass in den Hydraten weltweit 10-mal mehr Gas enthalten ist als in allen konventionellen Lagerstätten. Methanhydrate sind hauptsächlich für Staaten interessant, die heute einen Großteil ihrer Energierohstoffe importieren müssen. Vor allem in Japan und Südkorea sind fossile Brennstoffe teuer, weil sie per Schiff angeliefert werden. Beide Nationen verfügen über große Mengen an Methanhydrat in ihrem Küstengebiet und wollen diese künftig verstärkt nutzen. Noch aber fehlt es an der erforderlichen Technik, um aus Hydraten in großem Stil Methangas zu fördern.

Da Methanhydrate weiches Sediment wie Kitt zusammenhalten, fürchten Kritiker, dass durch den Abbau Kontinentalhänge ins Rutschen geraten und so Tsunamis ausgelöst werden könnten. Wissenschaftler entgegnen, dass

in flachen Gebieten abgebaut wird und die Bohrungen kleinräumig sind, sodass nicht mit großen Hangrutschungen zu rechnen ist. Befürchtet wird heute auch, dass durch die Erwärmung der Meere große Mengen des starken Treibhausgases Methan in der Tiefe frei werden und bis in die Atmosphäre aufsteigen könnten. Auch hier beschwichtigen Forscher: Nach ihren Erkenntnissen liegen 95 Prozent aller weltweiten Vorkommen in Tiefen von mehr als 500 Metern und sind dort für lange Zeit vor einer Erwärmung geschützt.

Für Hochtechnologieanwendungen und moderne elektronische Massenprodukte wie Fotovoltaikanlagen, Motoren von Hybridautos oder Smartphones benötigt man heute eine Fülle von Rohstoffen, beispielsweise Metalle, die aus Erzen gewonnen werden. Auch diese sind am Meeresboden in großen Mengen zu finden. Metalle sind insbesondere in 3 Typen von mineralischen Vorkommen enthalten: in Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfiden. Die kartoffel- bis salatkopfgroßen Manganknollen liegen in manchen Meeresgebieten in großer Zahl auf dem Sediment. Sie entstehen, indem sich um kleine Keime am Meeresboden wie zum Beispiel Muschelsplitter in Millionen Jahren Metallverbindungen anlagern, die im Meerwasser enthalten sind. Weltweit gibt es 4 große Manganknollengebiete, von denen das größte, die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) im Pazifik, so groß wie Europa ist. Manganknollen enthalten Mangan, Eisen und viele andere für die Industrie wichtige Metalle. Kobaltkrusten wiederum sind steinharte Beläge, die sich auf Seebergen bilden. Seeberge kommen weltweit in verschiedenen Meeresgebieten vor. Besonders krustenreiche Seeberge finden sich in der Primären Krustenzone (Prime Crust Zone, PCZ) 3000 Kilometer südwestlich von Japan. Die Krustenmenge in der PCZ wird auf rund 7,5 Milliarden Tonnen geschätzt.

Kobaltkrusten entstehen ähnlich wie Manganknollen durch die Ablagerung metallhaltiger chemischer Verbindungen, die im Meerwasser vorkommen. Sie bilden sich an den Flanken der Seeberge. Kobaltkrusten enthalten ebenfalls Mangan und Eisen, außerdem Kobalt und andere Metalle. Massivsulfide wiederum entstehen an heißen untermeerischen Quellen, indem sich metallhaltige Schwefelverbindungen aus der Tiefe um die Quellen ablagern. Die Massivsulfide sind interessant, weil sie hohe

Gold- und Silbergehalte aufweisen. Besonders vielversprechend sind unter anderem die Vorkommen in der Bismarcksee vor Papua-Neuguinea.

Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfide sind für die Industrie aus verschiedenen Gründen von Bedeutung. Da viele Metalle heute quasi monopolartig in wenigen Staaten und insbesondere in China abgebaut werden, wollen sich Industrienationen wie Deutschland oder Frankreich, die kaum über eigene Ressourcen verfügen, mit eigenen Claims am Meeresgrund ein Stück weit unabhängiger machen.

Damit sich der Meeresbergbau aber nicht zu einem Wettlauf um die besten Claims auswächst, wird er im Gebiet des internationalen Meeresbodens durch die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) geregelt. Diese UN-Behörde vergibt Erkundungslizenzen und sorgt zudem dafür, dass wertvolle Rohstoffvorkommen für Entwicklungsländer reserviert bleiben. Reglements für den künftigen Abbau werden derzeit erarbeitet und sollen 2016 zunächst für Manganknollen vorliegen. Erst danach kann der Meeresbergbau auf internationalem Terrain beginnen. Bemerkenswert ist, dass der Meeresumweltschutz in den Reglements der ISA eine große Rolle spielt. So müssen in den Abbaugebieten große Bereiche ausgespart bleiben, um den Meeresboden zu schützen. Damit liegen erstmals in der Geschichte klare Spielregeln für die Verteilung eines Rohstoffs und den Umweltschutz vor, ehe der Abbau beginnt. Derzeit gibt es 12 Lizenzen für die Erkundung von Manganknollen in der Clarion-Clipperton-Zone. Für den Indischen Ozean wurde bisher 1 Lizenz vergeben.

Während es für das internationale Gebiet des Meeresbodens also einheitliche und strenge Regeln für den Meeresbergbau gibt, entscheiden in den Einflussgebieten der Küstenstaaten diese allein darüber. Zwar ist jeder Staat nach dem Seerechtsübereinkommen (SRÜ) dazu verpflichtet, die Meeresumwelt zu schützen, doch ist die Verschmutzung von Küstengewässern weiterhin vielerorts gang und gäbe. So wird befürchtet, dass mit dem Meeresbergbau hier neue Umweltprobleme entstehen. Konkret gehen Umweltschützer davon aus, dass durch den großflächigen Abbau insbesondere endemische Arten am Meeresboden stark gefährdet sind. Meeresbiologen fordern daher weitere detaillierte Umweltstudien, um die Gefahren des

Meeresbergbaus besser einschätzen zu können, ehe er beginnt. Doch steht zu befürchten, dass in manchen Gebieten schon vorher Abbaugeräte anrollen.

Abgesehen davon, dass gemäß chemischer Analysen sowieso nur wenige Kobaltkrusten- und Massivsulfidvorkommen so reich an Metallen sind, dass ein Abbau momentan lohnenswert ist, gibt es kritische Stimmen, die sich prinzipiell dagegen aussprechen. Beide Vorkommen bilden feste Strukturen, auf denen sich im Laufe der Zeit artenreiche Lebensgemeinschaften aus feststehenden Organismen wie etwa Schwämmen oder Korallen gebildet haben. Ein großflächiger Abbau ist nach Ansicht von Biologen nur dann zu vertreten, wenn die Unternehmen Bereiche unangetastet lassen, aus denen die abgeernteten Gebiete wiederbesiedelt werden können.

Ob es jemals einen Meeresbergbau in großem Stil geben wird, ist offen. Er wäre zwar teurer als der Bergbau an Land, potentielle Konflikte um die Landnutzung ließen sich aber umgehen. Der Inselstaat Papua-Neuguinea will in den kommenden 2 Jahren zusammen mit einem internationalen Bergbaukonzern gold- und silberhaltige Massivsulfide in seiner 200-Seemeilen-Zone abbauen. Und aller Voraussicht nach wird nach 2016 der Abbau von Manganknollen in der Clarion-Clipperton-Zone beginnen. Doch auch an Land gibt es nach Ansicht der Geowissenschaftler noch viele unentdeckte Lagerstätten, die somit theoretisch den wachsenden Bedarf an mineralischen Rohstoffen auch in Zukunft decken könnten. Am wahrscheinlichsten erscheint daher ein moderater Abbau von mineralischen Rohstoffen im Meer, der bei Bedarf den Abbau an Land ergänzt.

Die weltweite Nachfrage nach fossilen Energieträgern und mineralischen Rohstoffen wird auch künftig nicht ohne Weiteres abnehmen. Sinnvoll erscheint es aber, nicht nur neue Versorgungsquellen zu erschließen, sondern gleichzeitig neue technische Verfahren zur Wiederverwertung von Rohstoffen zu entwickeln. Dazu gehören beispielsweise auch die Schaffung von Sammelinfrastrukturen und die Etablierung von Transportketten auf internationaler Ebene. Eine langfristige Strategie für eine umweltschonende Energie- und Rohstoffgewinnung zum Wohle der kommenden Generationen ist unabdingbar. Wir hoffen, der WOR 3 kann zu der Formulierung solch einer Strategie ein wenig beitragen.

Glossar

antarktisches Bodenwasser: sauerstoffreiches Wasser mit hohem Salzgehalt, das in den Gewässern um die Antarktis ganz bis zum Meeresboden absinkt und in der Tiefe weit um den Globus und bis in den Nordatlantik fließt.

chemoautotroph: Mikroorganismen, die Energie für ihren Stoffwechsel aus chemischen Verbindungen gewinnen, nennt man chemoautotroph. Chemoautotrophe Organismen werden von photoautotrophen Lebewesen unterschieden, die ihre Energie aus Sonnenlicht gewinnen, beispielsweise den Pflanzen.

endemisch: Pflanzen- und Tierarten, die weltweit nur in einem bestimmten, eng begrenzten Gebiet auftreten, bezeichnet man als endemisch. Endemische Arten können leicht durch Zerstörung ihres Lebensraums ausgelöscht werden.

G-20-Staaten: Gruppe der wirtschaftlich wichtigsten Industrie- und Schwellenländer. Ihr gehören 19 einzelne Staaten sowie Nationen der Europäischen Union an. Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Italien werden in der Liste der G-20-Staaten einzeln geführt. In der Liste sind die Nationen absteigend nach der Höhe des Bruttoinlandsprodukts aufgeführt.

Kondensat (Gaskondensat): ein Gemisch aus etwas schwereren Kohlenwasserstoffen, das bei der Erdgasförderung mit anfällt. Zu den Inhaltsstoffen dieses Erdgasbegleitprodukts zählen unter anderem Pentan und größere, teils ringförmige Moleküle (sogenannte Aromaten und Cycloalkane). Gaskondensat ist aufgrund seiner Inhaltsstoffe bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck in der Regel flüssig. Da es in seiner Zusammensetzung leichten Ölbestandteilen ähnelt, wird es vom Erdgas abgetrennt und in Raffinerien unter anderem zu Benzin verarbeitet.

Kontinentalabhang: der Bereich des Meeresbodens, an dem der flache küstennahe Meeresboden, der Kontinentalschelf, in die Tiefsee abfällt.

Mittelozeanische Rücken: Höhen- oder Gebirgszüge am Meeresgrund, die wie die Nähte eines Baseballs fast den ganzen Globus umspannen. Sie entstehen dort, wo Kontinentalplatten untermeersch auseinanderdriften. An diesen Bruchstellen, die meist inmitten der Ozeane liegen, steigt heißes Magma auf, das im Wasser erkaltet und sich mit der Zeit zu mächtigen Gebirgen auftürmt.

Ostpazifischer Rücken: ein im Südostpazifik verlaufender Mittelozeanischer Rücken.

Phytoplankter: pflanzliche Planktonorganismen, die meist mikroskopisch klein sind. Dazu zählen unter anderem Mikroalgen. Die Planktonorganismen sind dadurch charakterisiert, dass sie keine oder kaum Eigenbewegungen haben und deshalb von Wasserströmungen verdriftet werden.

Primärproduktion: der Aufbau von Biomasse durch Pflanzen oder Bakterien. Die Primärproduzenten gewinnen ihre Energie beispielsweise aus Sonnenlicht oder bestimmten chemischen Verbindungen

und synthetisieren in ihrem Stoffwechsel energiereiche Substanzen – beispielsweise Kohlenhydrate. Diese Substanzen wiederum sind Lebensgrundlage der Tiere oder des Menschen.

ratifiziert, Ratifizierung: verbindliche Erklärung der Gültigkeit eines völkerrechtlichen Vertrags. Schließen verschiedene Nationen einen Vertrag, ist dieser nicht automatisch völkerrechtlich gültig und bindend. Auch das Unterzeichnen der Vertragsurkunde allein reicht noch nicht. Vielmehr müssen die Nationen zusätzlich verbindlich den Vertragsabschluss erklären, den Vertrag ratifizieren: In der Regel unterzeichnet ein Staatsoberhaupt oder ranghoher Politiker dazu eine Ratifikationsurkunde. Voraussetzung für die Ratifizierung ist in der Regel ein Rechtsakt nach dem Recht des jeweiligen Staates – also zum Beispiel ein Parlamentsgesetz, mit dem das Parlament seine Zustimmung zu den im internationalen Vertrag ausgehandelten Regeln erklärt. In Deutschland zum Beispiel müssen die durch die Bundesrepublik abgeschlossenen Verträge noch durch den Bundestag absegnet werden. Erst wenn dies erfolgt ist, kann die Ratifikationsurkunde ausgestellt werden.

Rio+20-Gipfel: ein internationaler Nachhaltigkeitsgipfel, der im Jahre 2012 genau 20 Jahre nach der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (United Nations Conference on Environment and Development, UNCED) von 1992 in Rio de Janeiro stattfand.

symbiontisch: Individuen verschiedener Tierarten, die so in Koexistenz leben, dass ein Lebewesen von dem anderen profitiert, nennt man symbiontisch.

Versauerung (Ozeanversauerung): Kohlendioxid, das durch Verbrennungsprozesse in die Atmosphäre gelangt, wird zu einem großen Teil in den Ozeanen gelöst, wodurch das Meerwasser versauert. Streng genommen bleibt das Meerwasser eher basisch. Da der Säuregrad des Wassers, der pH-Wert, aber in Richtung Säure sinkt, spricht man dennoch von einer Versauerung des Wassers oder einfach der Ozeanversauerung.

Verwitterungsboden: Gesteinszersetzung mit Anreicherung schwer löslicher Stoffe unter Beteiligung biologischer Prozesse.

Völkergewohnheitsrecht: eine Form des ungeschriebenen Völkerrechts. Nach dem Völkergewohnheitsrecht gelten bestimmte Aspekte als Rechtsgrundsatz, wenn es diesbezüglich eine international übereinstimmende, dauerhafte Rechtspraxis und eine entsprechende Rechtsüberzeugung gibt. Beispiele sind das Verbot von Folter und die Anerkennung des Luftraums beziehungsweise der 12-Seemeilen-Zone als Staatsgebiet. Diese Regeln sind völkerrechtlich bindend für alle Staaten – unabhängig von einem Vertragsabschluss. Ein wesentliches Kriterium ist, dass die jeweilige Rechtsüberzeugung in einer weit überwiegenden Zahl von Ländern gilt. Auch bei Aspekten, die nur einen Teil der Nationen betreffen, kann das Völkergewohnheitsrecht zum Tragen kommen. So gibt es zum Beispiel die Regel, dass die 12-Seemeilen-Zone nach dem Völkergewohnheitsrecht selbstverständlich zum Staatsgebiet gehört, obwohl nicht jedes Land eine Küste hat.

Das Glossar definiert Begriffe, die für das Verständnis der Texte besonders wichtig sind, aber in den einzelnen Kapiteln aus Platzgründen nicht ausführlich erläutert werden können. Glossarbegriffe sind gefettet und leicht zu erkennen.

Abkürzungen

APEI Area of Particular Environmental Interest; Meeresgebiet von besonderer Bedeutung für den Naturschutz

AUV Autonomous Underwater Vehicle; Autonomes Unterwasserfahrzeug

AWZ Ausschließliche Wirtschaftszone

BALEX Baltic Exercise; internationale Ölbekämpfungsübung in der Ostsee

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

BONNEX Bonn Convention Exercise; internationale Ölbekämpfungsübung in der Nordsee

BOP Blowout-Preventer; Mechanismus, der das Hervorschießen von Erdgas und Erdöl aus einem Bohrloch verhindert

BRIC Brasilien, Russland, Indien und China (BRIC-Staaten)

BSEE Bureau of Safety and Environmental Enforcement; US-Behörde für Sicherheit und Umweltrecht

BSR Bottom Simulating Reflector; den Meeresboden simulierender Reflektor

CBD Convention on Biological Diversity; Biodiversitätskonvention

CCZ Clarion-Clipperton-Zone

DISCOL Disturbance and Recolonization; Störung und Wiederbesiedlung (Forschungsprojekt)

DOE Department of Energy; US-Energieministerium

DÜ Durchführungsübereinkommen

EBSA Ecologically or Biologically Significant Marine Areas; ökologisch oder biologisch bedeutende Meeresgebiete

EOR Enhanced Oil Recovery; gesteigerte Ölförderung

FPSO Floating Production Storage and Offloading Units; schwimmende Produktions-, Lager- und Ladeinheiten

GHSZ Gashydratstabilitätszone

GLR Gewichtetes Länderrisiko

GOODS Global Open Ocean and Deep Sea-habitat; weltweite Meeres- und Tiefseelebensräume (Forschungsbericht)

GPS Global Positioning System; globales Satellitensystem zur Positionsbestimmung

HHI Herfindahl-Hirschman-Index

ICCAT International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas; Internationale Kommission für den Schutz des atlantischen Thunfisches

ICES International Council for the Exploration of the Sea; Internationaler Rat für Meeresforschung

IEA International Energy Agency; Internationale Energieagentur

IJC International Joint Commission; Internationale Gemeinsame Kommission

IMO International Maritime Organization; Internationale Seeschiffahrts-Organisation

IOPC International Oil Pollution Compensation Funds; Internationaler Fonds für die Kompensation von Ölverschmutzungen

ISA International Seabed Authority; Internationale Meeresbodenbehörde

ISM Code International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention; internationale Vereinbarung für den sicheren Schiffsbetrieb

LCD Liquid Crystal Display; Flüssigkristall-Bildschirm

LED Light emitting diode; Leuchtdiode

LNG Liquefied Natural Gas; verflüssigtes Erdgas

MARPOL International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung

MeBo mobile Bohreinrichtung

MPA Marine Protected Area; Meeresschutzgebiet

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration; Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA

NOWPAP Northwest Pacific Action Plan; Abkommen zum Schutz des Nordwestpazifiks

OBS Ozean-Bodenseismometer

OPA Oil Pollution Act; US-amerikanische Gesetzesvorschrift zur Vermeidung von Ölverschmutzungen

OPEC Organization of the Petroleum Exporting Countries; Organisation der Erdöl exportierenden Länder

OSPAR Oslo-Paris-Konvention

PCZ Prime Crust Zone; Primäre Krustenzone

PETM Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum

PSSA Particularly Sensitive Sea Area; besonders sensibles Meeresgebiet

REMPEC Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea; regionales Notfallzentrum für den Schutz des Mittelmeers

RFMO Regional fisheries management organisation; Regionale Organisation für das Fischereimanagement

RPEN Regulations on Prospecting and Exploration of Polymetallic Nodules; Regelwerk für die Prospektion und Exploration von Manganknollen

SOPAC Secretariat of the Pacific Community Applied Geoscience and Technology Division; eine Abteilung für angewandte Geowissenschaften und Technologie des Sekretariats der Pazifischen Gemeinschaft

SOS seegangsunabhängiger Öl-Skimmer

SRÜ Seerechtsübereinkommen

TLP Tension Leg Platform; zugspannungsverankerte Plattform

UMP Umweltmanagementplan

UNEP United Nations Environment Programme; Umweltprogramm der Vereinten Nationen

UVP Umweltverträglichkeitsprüfungen

VME Vulnerable Marine Ecosystem; schutzwürdiges Meeresökosystem

Mitwirkende

Zur Erstellung des „World Ocean Review“ 2014 haben viele Experten mit ihrem Fachwissen beigetragen. Beteiligt waren insbesondere Wissenschaftler, die gemeinsam im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ zu Fragestellungen der Entwicklung unserer Meere forschen.

Dr. Christian Bückner, Geophysiker, Leiter Forschung und Entwicklung in einem deutschen Unternehmen der Kohlenwasserstoffexploration und -produktion. Spezialgebiet Bohrlochgeophysik, vielfältige Erfahrung aus der Teilnahme an wissenschaftlichen Bohrprojekten wie dem KTB (Kontinentales Tiefbohrprogramm) der Bundesrepublik Deutschland, dem internationalen Ocean Drilling Program (ODP) und dem Cape Roberts Antarctic Drilling Project (CRP). Forschungsaufenthalte in der Antarktis. Langjährige Tätigkeit auf Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie im In- und Ausland. Nebenbei Co-Editor des „International Journal of Earth Sciences“, Mitarbeit in Wissenschaftlichen Beiräten in Kiel und Hannover sowie Lehrbeauftragter an der Universität Hamburg. Sein Fachinteresse gilt den Bohrlochmessungen und einer statistisch abgesicherten objektivierte Bewertung der zugrunde liegenden gesteinsphysikalischen Parameter.

Dr. Uwe Jenisch, Honorarprofessor für Internationales Seerecht am Walther-Schücking-Institut für Internationales Recht an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), zugleich Mitglied des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“. Als Verwaltungsjurist hat er seit 1970 in verschiedenen deutschen Ministerien für die Schifffahrt, die Meeresforschung und -technik und für das Seerecht gearbeitet. Er war Mitglied der Deutschen Seerechtsdelegation bei der 3. UN-Seerechtskonferenz der Vereinten Nationen und hat Seerecht an den Universitäten Kiel und Rostock sowie an der World Maritime University in Malmö gelehrt. Aktuelle Arbeitsgebiete sind das Recht des Tiefseebergbaus, die Rechtslage der Arktis und Fragen der maritimen Sicherheit.

Stephan Lutter, Meeresökologe und Zoologe für den World Wide Fund for Nature (WWF) Deutschland und WWF International im Bereich Meeresschutz. Er verfolgt und dokumentiert die weltwei-

te Entwicklung von „Ocean Governance“. Als Referent für internationalen Meeresschutz und Meeresschutzgebiete vertritt er den WWF in zahlreichen internationalen Gremien, unter anderem dem Abkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR) und der Nordostatlantischen Fischereikommission (NEAFC) sowie einschlägigen Arbeitsgruppen der EU zur Umsetzung von Natura 2000 und der Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL). Er war maßgeblich an der Ausweisung der „Charlie-Gibbs Marine Protected Area“ auf der Hohen See des Nordostatlantiks und vieler anderer küstenferner Meeresschutzgebiete beteiligt. Im Vordergrund seiner Arbeit stehen außerdem Schutzmaßnahmen für bedrohte Arten, Lebensräume und -gemeinschaften der Hochsee und Tiefsee durch Regulierung von Fischerei, extraktiven Industrien und Schifffahrt.

Prof. Dr. Nele Matz-Lück, Co-Direktorin des Walther-Schücking-Instituts für Internationales Recht an der CAU Kiel. Ihre Forschungsschwerpunkte sind das internationale Seerecht sowie das internationale Umweltrecht. Ihr besonderes Interesse gilt dabei dem Meeresumweltschutz in Bezug auf verschiedene Nutzungen der Ozeane durch den Menschen, zum Beispiel beim Ressourcenabbau, aber auch im Zusammenhang mit der Schifffahrt. Eine weitere konkrete Fragestellung betrifft Inhalt und Grenzen der Ausweisung von Schutzgebieten auf Hoher See.

Jürgen Messner, Erdölgeologe bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Er berät Ministerien, Fachbehörden und Industrie bezüglich der globalen Verfügbarkeit von fossilen Energierohstoffen und ist verantwortlicher Referent für den Bereich Erdgas. Zuvor war er beim niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie unter anderem zuständig für die jährliche Berichterstattung der deutschen Erdöl- und Erd-

gasvorräte. Er blickt darüber hinaus auf eine langjährige Industrietätigkeit zurück, in der er zu Beginn auch verantwortlich für den Ablauf des Bohrbetriebs auf Plattformen in der britischen Nordsee war. Er hat zahlreiche Projekte zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdöl und Erdgas weltweit geleitet und konnte in vielen Studien seine erdölgeologische Expertise einbringen. Ein Schwerpunkt dabei war die geologische Beckenanalyse hinsichtlich des Vorkommens von Kohlenwasserstoffen.

Dr. Sven Petersen, Mineraloge am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung GEOMAR, Kiel. Er erforscht die Genese und zeitliche Entwicklung submariner heißer Quellen und der mit ihnen assoziierten Erzablagerungen. Sein Interesse gilt dabei, neben der Untersuchung des Rohstoffpotenzials dieser Vorkommen aus dem Meer, der Erforschung des Untergrunds der Vorkommen durch Bohrungen und der Nutzung autonomer Unterwasserfahrzeuge für die Exploration mariner Rohstoffe.

Prof. Dr. Lars H. Rüpke, Geophysiker am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung GEOMAR, Kiel. Seine Arbeitsgruppe entwickelt Computermodelle, welche die grundlegenden Prozesse der Ressourcenbildung am Meeresboden simulieren. Diese Modelle helfen bei globalen Ressourcenabschätzungen und erlauben eine Synthese interdisziplinärer Ergebnisse. Forschungsschwerpunkte sind Hydrothermalsysteme am Meeresboden, passive Kontinentalränder sowie marine Gashydratvorkommen.

Dr. Ulrich Schwarz-Schampera, Lagerstättenexperte und Rohstoffgeologe bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Er berät Ministerien, Fachbehörden und Industrie bezüglich der geologischen Anreicherung und globalen Verfügbarkeit von Metallen (Bunt- und Edelmetalle; Hochtechnolog-

giemetalle) und ihrer lagerstätten-genetischen Stellung. Er ist verantwortlicher Projektleiter für die Beantragung und Durchführung des INDEX-Programms zur Exploration polymetallischer Sulfidvorkommen im Indischen Ozean bei der Internationalen Meeresbodenbehörde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Er arbeitet seit mehr als zwanzig Jahren an aktiven Hydrothermalvorkommen am Meeresboden sowie deren fossilen Äquivalenten an Land, vorrangig in Kanada und Südafrika. Darüber hinaus war er zwischen 2004 und 2011 alleiniger deutscher Vertreter in der Urangruppe der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEA.

Prof. Dr. Klaus Wallmann, Geochemiker am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung GEOMAR, Kiel. Seine Interessenschwerpunkte sind Gashydrate im Meeresboden, ihre Entstehung und Stabilität sowie kalte Quellen und Schlammvulkane am Meeresboden. Zudem untersucht er den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen in Meeressedimenten und die Rückführung von Nährstoffen vom Sediment in das Ozeanwasser.

Weitere Mitarbeiter dieses Bandes:

Prof. Dr. Christian Berndt, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung GEOMAR, Kiel

Dr. Jörg Bialas, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung GEOMAR, Kiel

Johannes Fuchs, Walther-Schücking-Institut für Internationales Recht der CAU, Kiel

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. Polastro, 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 Roh-

stoffstrategien 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 Satellitenbild-
 werkstatt, 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 Erd-
 gasgewinnung; 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, Wiki-
 media 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: mari-
 bus; 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 Cela-
 no/Reuters; Abb. 1.39: Dave Martin/picture alliance/AP Photo;
 Abb. 1.40: maribus; Abb. 1.41: ITOPF; Abb. 1.42: Bonn Agree-
 ment; 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 Partner-
 ship, 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 Geowissenschaf-
 ten 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 Par-
 ty; 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 Com-
 mons; 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 Umweltwissen-
 schaften, Universität Bremen; Foto: V. Diekamp, MARUM – Zen-
 trum 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 Insti-
 tute for Space Studies; Abb. 3.15: Geomar; Abb. 3.16: nach
 Ruppel; S. 120/121: Claudius Diemer, albedo39 Satellitenbild-
 werkstatt, 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, Mikrover-
 filmung 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.

Index

Gefettete Seitenzahlen
verweisen auf diejenigen
Textstellen, die für das
Verständnis besonders
wichtig sind.

3-D-Seismik **23**, 110
200-Seemeilen-Zone 69 ff.,
120 ff.
2500-Meter-Tiefenlinie 121

A

Abraum 81
Abtretungsklausel 125
ABT Summer 137
Abwärme 12
aerobe Mikroorganismen 102
Afrika 14
Airgun **23**, 109
Akku 54
Alabama 40
Alaminos Canyon Block 818
99
Alaska 42, 96, 114
Algenbiomasse 20 ff.
Algenwachstum 20
Allmende 128 ff.
Aluminium (Al) 56 ff.
Aviniconcha 90
Ammoniaksynthese 11
Angola 44, 136 f.
Angra dos Reis 41
Anpassungsfähige Plattform
32 ff.
antarktisches Bodenwasser 68
Antiklinale 22
Antimon (Sb) 54 ff.
Area of Particular Environmen-
tal Interest, APEI 128 ff.
Argentinien 133
Arktis 19, 49, 114, **128 ff.**
Ärmelkanal 45
Arsen (As) 56 ff., 67 ff.
Asien 107
Äthan 21
Atlantis-II-Tief 91
Ausschließliche Wirtschaftszo-
ne (AWZ) 69, 107, **120 ff.**,
132 ff.
äußerer Festlandssockel 121
Australasien 14
Australien 135
Autonomes Unterwasserfahr-
zeug (Autonomous Under-
water Vehicle, AUV) 86

B

Backarc-Becken 83 ff.
Bakterien 20 ff., 114 ff.
Balex (Baltic Exercise) 43
Barentssee 23
Bauindustrie 54 ff.

Bauxit 60
Benzol 46
Bermudadreieck 113
Betonplattformen 30 ff.
Bewegung für die Emanzipa-
tion des Nigerdeltas (Move-
ment for the Emancipation of
the Niger Delta, MEND) 136
Bikarbonat 115
Biomasse 20 ff.
Birnessit 68
Bismarcksee 87 ff.
Bismut (Bi) 67 ff.
Blei (Pb) 56 ff.
Blowout 113
Blowout-Preventer (BOP)
38 ff.

Bohrgestänge 25 ff., 38 ff.
Bohrkern 110 f.
Bohrkopf 38 ff.
Bohrkrone 25
Bohrloch 38 ff.
Bohrlochkopf 29 ff.
Bohrlochwand 38 ff.
Bohrmeißel 24 ff.
Bohrplattformen **29 ff.**
Bohrschiff 29 ff.
Bohrtechnik 108
Bonnex-Übung (Bonn Conven-
tion Exercise) 43
Bonn-Übereinkommen 42
Borstenvürmer 72
Bottom Simulating Reflector
(BSR, den Meeresboden
simulierender Reflektor)
98 ff., 109

BP 40 ff.
Brasilien 18, 133
Bretagne 36
BRIC-Staaten 54
British Columbia 141
Bulgarien 70
Bullwinkle 30 ff.
Bundesanstalt für Geowis-
senschaften und Rohstoffe
(BGR) 70
Bushveld-Region 59
Butan 21

C

Cadmium (Cd) 56 ff.
Capping Stack 40 ff.
Celle 20
Chalkopyrit 57, 82
Chalkosin 57
Chatham Rise 65

chemoautotroph 90
Cheyenne-Gasfeld 10
Chikyu 106
Chile 130
China 11, 43 ff., 54 ff., 70,
77, 89, 107, 124 f.
Chrom (Cr) 56 ff.
Clarion-Clipperton-Zone (CCZ)
66 ff., 74 ff., 128 ff.
Clathrat **97 ff.**
cobalt-rich ferromanganese
crusts (kobaltreiche Eisen-
mangankrusten) **74 ff.**
Compliant Platform 30 ff.
Computersimulation 107
Constellation 30 ff.
Cookinseln 69
Cornwall 36

D

Dänemark 11, 131
Dauphin Island 40
Deepwater Horizon **36 ff.**,
113, 132
Deutschland 11, 70, 105, 125
diagenetisches Wachstum
68 ff.
Diskordanz 22
Dispergatoren 44
Dispersionen 46
Disturbance and Recoloniza-
tion (DISCOL, Störung und
Wiederbesiedlung) 73
Doppelhüllentanker 37
Druckentlastung 104 ff.
Dubai 64
Durchführungsübereinkom-
men (DÜ) 122 ff.

E

EBSA (Ecologically or Biolo-
gically Significant Marine
Area) 129
Eisen (Fe) 56 ff., 66 ff.
Eisenhydroxidoxid [FeO(OH)]
76 f.
Elektromagnetik 24 ff., 111
Elektroschrott 60 f.
elektrostatistische Kräfte 97
Elfenbeinküste 136
endemisch 90
Energieträger 11 ff.
Energieverbrauch 10–19
Enhanced Oil Recovery (EOR)
27 ff.

Enterprise 122 ff.
Erderwärmung 114
Erdgas **10 ff.**, 20 ff., **96 ff.**,
104 ff.
Erdöl **10 ff.**, 20 ff., 104 ff.
Erdölmuttergestein 20 ff.
erneuerbare Energien 11 ff.
Erze 54 ff.
Ethan 96
Ethylen 20
Europa 14
Europäische Union 42
Exploration **23 ff.**, **107 ff.**,
123
Explorationslizenz 123
Extended-Reach-Bohrung 25
Exxon Valdez 42

F

Fächerecholot 109
Fallenstruktur 20
Faulschlamm 20
Feste Plattform 32 ff.
Festlandssockel **120 ff.**, 132 ff.
Festlandssockelgrenzkommis-
sion 122, 128 ff.
Filterierer 80
Fixed Platform 29 ff.
Flachwasserbereich 17 ff.
Floating Platforms 31 ff.
Floating Production Storage
and Offloading Units (FPSOs)
29 ff.
Florida 40
Fluid 107
Flüssigerdgas (Liquefied Natu-
ral Gas, LNG) 15, 104 ff.
Flüssigkunststoff 27
Flusssäure 54
Flussspat 54
Fonds 138 ff.
Foraminiferen 72
Förderturm 10
fossile Brennstoffe 11 ff.
Fotovoltaikanlage 54 ff.
Fracking 16 ff.
Frankreich 36, 70, 89, 124,
125
Französisch-Guayana 19
Fujian 133
Fukushima 12, 104, 135

G

G-20-Staaten 133
Gakkelrücken 128
Gallium (Ga) 56 ff.

- Gammastrahlungsdetektoren 78
 Gashydratstabilitätszone (GHSZ) **99 ff.**, 114
 Gasimporteure 104
 Gazprom 49
 Gelber Raucher 84
 gemeinsames Erbe der Menschheit 121
 Georadar 24
 Germanium (Ge) 54 ff.
 Gesteinsfräse 89
 gewichtetes Länderrisiko (GLR) 57 ff.
 Ghana 19, 44
 Glimmer 54 ff.
 Gold (Au) 56 ff., 90 f.
 Golf von Mexiko 10 ff., 99, 113
 Golf von Thailand 34
 GOODS-Report (Global Open Oceans and Deep Sea-habitats) 79
 Grabenfräse 89
 Grafit 54
 Grauer Raucher 84
 Gravimetrie **23 ff.**
 Gravitation 23
 Gravitationskartoffel 23
 Great Barrier Reef 129
 Grönland 131
 Großbritannien 16, 64, 131
 Großforaminiferen 99
 G-TEC Sea Mineral Resources NV 70
 Guangzhou Marine Geological Survey (GMGS) 99
 Guernsey 36
 Gumusut-Kakap 99
 Guyed Tower 32 ff.
- H**
 Haftungskonvention 138 ff.
 Haifischzahn 68
 Halbleitertechnik 54 ff.
 Halbtaucher 24
 Halbtaucheranlage 38
 Hämatit 24
 Hangrutschung 112 ff.
 Havarie 36 ff.
 Havariekommando 43
 Hawaii 83
 Hebei Spirit 43, 139
 Helsinki-Konvention 43
 Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) **57 ff.**
- Hikurangi-Trog 99
 höchst gefährliche Tätigkeit 135 ff.
 Hoheitsgebiet 120 ff.
 Hohe See **121 ff.**
 Horizontalbohrung 25
 Hotspot 83
 Hubinsel 29 ff.
 Hybridauto 54 ff.
 Hydrat **96 ff.**
 Hydraulic Fracturing (hydraulisches Aufbrechen) 17 ff.
 hydrogenetisches Wachstum 68 ff.
 Hydrogensulfidanionen 115
 hydrophil 46
 Hydrothermalquellen 76, **82 ff.**
- I**
 Indien 11, 65, 70, 107, 125
 Indischer Ozean **66 ff.**
 Indium (In) 55 ff.
 Indonesien 46
 Industriemineralien 54 ff.
 Injektionsverfahren 107
 Injektion von Kohlendioxid 104 ff.
 Innere Mongolei 54
 innerer Festlandssockel 121
 Inselbogenvulkane **83 ff.**
 Internationale Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD) 129
 Internationale Energieagentur (International Energy Agency, IEA) 10 ff.
 Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) 61 ff., 69 ff., 77 ff., 89, **121 ff.**, **132 ff.**
 Internationaler Rat für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea, ICES) 64
 Internationaler Seegerichtshof 122
 Internationales Seerecht 69–71
 Internationale Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organisation, IMO) 42, 129, 138
- International Joint Commission (IJC) 140
 International Oil Pollution Compensation Funds (IOPC, Internationaler Fonds für die Kompensation von Ölverschmutzungen) 138 ff.
 International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78 37 ff.
 Interoceanmetal Joint Organization 70, 124
 Intraplattenvulkane **83 ff.**
 Irak 14
 Iran 12, 14, 27, 130
 ISM-Code (International Safety Management Code) 42
 Israel 19
- J**
 Japan 12 ff., 43 ff., 70, 77, 96, 104 ff., 112, 124
 Joint-Inversion-Verfahren 111
 Jom-Kippur-Krieg 27
- K**
 Kalk 115
 Kaltwasserkorallen 79
 Kalziumionen 115
 Kalziumkarbonat 115
 Kamerun 44
 Kanada 13, 98 f., 105, 114, 130 f., 140
 Kapstadt 41
 Kaskadien-Kontinentalrand 98
 Kaspisches Meer 19
 Kies 54 ff.
 Kiribati 70
 Kizomba A 35
 Klimawandel 19, 116
 Knoll 74 ff.
 Kobalt (Co) 56 ff., 67 ff., 74 ff.
 Kobaltionen (Co²⁺) 76 f.
 Kobaltkrusten 63, **74 ff.**, 122 ff.
 Kohle 11 ff.
 Kohlendioxid 104, 112 ff., 115
 Kohlendioxidhydrat 104
 Kohlensäure 115
 Kohlenstoff 20 ff.
 Kohlenwasserstoffe 20 ff.
 Kondensat 22
 Kontinentalhang 100 ff., 112 ff.
 Kontinentalränder 114 ff.
- Kontinentalwanderung 21
 konventionelle Reserven 14 ff.
 konventionelle Ressourcen 14 ff.
 Konvention zur Haftung bei Schäden durch Ölunfälle (International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage) 138 ff.
 Konzentrationsmessung 57
 Korallenriffe 22
 Korea 112
 Krishna-Godavari-Becken 99
 kritischer Punkt 107
 Kuba 70
 Kulluk 49
 Kupfer (Cu) 54 ff., 66 ff., 91
 Kupferbergbau 60
 Kupferionen (Cu²⁺) 76 f.
 Kupfermine 133
 Küstenmeer 120 ff.
 Kuwait 14
 Kwanza-Becken 19
- L**
 Lagerstättendruck **26 ff.**
 Landlagerstätte 54 ff.
 Landnutzungsgesetz 136 f.
 Landpflanzen 21
 LED 54
 lipophil 46
 Lithium (Li) 56 ff., 67 ff.
 LNG 12 ff.
 LNG-Tanker 15
 Louisiana 40
 Luanda 137
- M**
 Mackenzie-Flussdelta 105
 Maghemit 24
 Magma 83
 Magmakammer 63
 Magnetfeld 24
 Magnetik 23 ff.
 Magnetit 24
 Magnetresonanztomograph (MRT) 54
 Makrofauna 72
 Malaysia 99
 Mallik 98
 Mangan (Mn) 56 ff., 66 ff., 74 ff.
 Manganknollen 63, **66 ff.**, 74 ff., 122 ff.

- Manganoxid (Vernadit, MnO_2) 76 f.
- Mangrovenwälder 49
- Manus-Becken 87
- Marine Protected Area (MPA) 129
- Marokko 65
- Massivsulfide 63, **82 ff.**, **122 ff.**
- Meeresbergbau 61 ff.
- Meeressäuger 50
- Meeresschutzgebiet 129
- Meeresspiegel 21
- Meeres- und Küstennutzungsgesetz (Marine and Coastal Access Act) 65
- Mega fauna 72
- Mehrkanaalseismik 109
- Meiofauna 72
- Messoyakha 99
- Metalle 54 ff.
- Metalle der Seltenen Erden 54 ff.
- Metallionen 76 f.
- Metallschlamm 91
- metallurgische Verfahren 71
- Methan 21, **96 ff.**, 115
- Methan biogen **96 ff.**
- Methanblasen 113
- Methanhydrat **96 ff.**
- Methanhydratvorkommen **96 ff.**
- Methanogenese **96 ff.**
- Methansensor 109
- Methan thermogen 100 ff.
- Mexiko 133, 141
- Mikroalgen 20
- Mikrochip 61 ff.
- Mikrofauna 72
- mineralische Rohstoffe **54 ff.**
- Miningcode 126
- Mining Test 126
- Mississippi-Delta 40
- Mittelatlantischer Rücken 129
- Mittelozeanischer Rücken **83 ff.**
- Mizelle 46
- mobile Bohreinrichtung (MARUM- MeBo) 108
- Molybdän (Mo) 56 ff., 67 ff.
- Molybdänoxid (MoO_4^{2-}) 76 f.
- Montara-Bohrinsel 135
- Mosambik 19
- Multilateralbohrung 25
- Muschelsplitter 68
- Muttergestein 20 ff.
- N**
- Naher Osten 11
- Nährstoffe 100
- Namibia 65
- Nankai-Trog 99, 105, 107
- National Wildlife Federation 41
- Nauru 70, 123 ff.
- Nematoden 72
- Neuseeland 65, 99, 107
- New Orleans 41
- nichtkonventionelle Reserven 14 ff.
- nichtkonventionelle Ressourcen 14 ff.
- Nickel (Ni) 56 ff., 66 ff., 74 ff.
- Nickelionen (Ni^{2+}) 76 f.
- Nickellateriterze 59
- Niederlande 64
- Nigeria 44, 136 f.
- Niob (Nb) 56 ff., 67 ff.
- Nordpol 130
- North Slope 98
- Northwest Eileen State 2 98
- Northwest Pacific Action Plan (NOWPAP) 43 ff.
- Norwegen 35, 41, 112
- Notfallpläne 42 ff.
- O**
- Ocean Drilling Program (ODP) 98
- Öleinheit 10 ff.
- Ölkonzerne 136 f.
- Ölkrise **27**
- Ölsande 13, 16
- Ölverschmutzung **36 ff.**
- Ölverschmutzungsgesetz der USA (Oil Pollution Act, OPA) 42
- Ölvorräte 14 ff.
- Onagawa 135
- Oregon 98
- Organisation der Erdöl exportierenden Länder (Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC) **27**, 114 ff.
- Ormen Lange 35
- Oslo-Paris-Konvention (OSPAR) 129
- Ostpazifischer Rücken **82 ff.**
- ostsibirisches Schelf 99
- Otter 50
- Oxide 76 f.
- Ozeanbodenseismometer (OBS) 111
- P**
- Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum (PETM) 116
- Palladium (Pd) 56 ff.
- Pallas 43
- Papua-Neuguinea 63, 87 ff.
- Peak Oil 16
- Peakplateau 16
- Penrhyn-Becken **66 ff.**
- Permafrostboden 96 ff.
- Permafrostgebiet 114 ff.
- Peru 130
- Peru-Becken **66 ff.**
- Pflanzendünger 65
- Phosphat 64
- Photooxidation 46
- Phytoplankton 20
- Pipeline 136 f.
- Plankton 20 ff., 96 ff.
- Planktonwachstum 79
- Plasmabildschirm 54
- Platin (Pt) 56 ff.
- Platinmetalle 67 ff.
- Plattentektonik 102
- Polen 70
- Polymer 27
- Pontchartrain-See 41
- Porenwasser 68, 102
- Prestige 134
- Primäre Krustenzone (Prime Crust Zone, PCZ) **74 ff.**
- Primärenergieverbrauch 11–19
- Primärförderung **26 ff.**
- Primärproduktion 90
- Prinz-William-Sund 42
- Propan 21, 96
- Propylen 20
- Prospektion **23 ff.**, **107 ff.**, 123
- Prudhoe Bay 98
- PSSA (Particularly Sensitive Sea Area; besonders sensibles Meeresgebiet) 129
- Pumpjacks 26
- Pyrit 82
- Q**
- Qilian-Hochgebirge 99
- Qingdao 132
- R**
- Radionuklide 78
- Raffinade 57
- Recycling 61 ff.
- Red Sea Commission 91
- Regelwerk für die Prospektion und Exploration von Kobaltkrusten (Regulations on Prospecting and Exploration for Cobalt-rich Ferromanganese Crusts) 125
- Regelwerk für die Prospektion und Exploration von Manganknollen (Regulations on Prospecting and Exploration of Polymetallic Nodules, RPEN) 124 ff.
- Regelwerk für die Prospektion und Exploration von Massivsulfiden (Regulations on Prospecting and Exploration for Polymetallic Sulphides) 124
- Regionale Organisation für das Fischereimanagement (Regional Fisheries Management Organisation, RFMO) 121
- Regionales Notfallzentrum für den Schutz des Mittelmeers (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea, REMPEC) 43
- Reichweite **13**
- Reiskultur 114
- Reserved Area 124 ff.
- Reserven **13**, **59 ff.**
- Ressource **13**, **59 ff.**
- Rhenium (Re) 54 ff.
- Richards Island 98
- Richtbohrtechnik 24 ff.
- Rio+20-Gipfel 129
- Rio de Janeiro 41
- Röhrenwürmer 90
- Rohstoffwirtschaft 13 ff.
- Rotary-Bohrverfahren 25
- Rotes Meer 91
- Rotterdam 64
- Royal Air Force 36
- Ruderfußkrebs 72
- Russland 43 ff., 70, 77, 89, 124 ff., 131

- S
- Salzstockflanke 22
 Salzstocküberhang 22
 Salzwiesen 49
 Sand 54 ff., 103
 Sandstein 103
 Santos-Becken 18
 Saudi-Arabien 14, 91
 Sauerstoff 76 f., 115
 Sauerstoffatome 97
 Sauerstofffreie Zone 20 ff.
 Sauerstoffminimumzone 76 f.
 Saugbaggern 64
 Schachtelhalmwälder 21
 Schelfgebiete 114
 Schiefergasvorkommen 14 ff.
 Schieferöl 16
 Schiffserkennungssystem 42
 Schlammvulkan 36
 Schleppnetzfischerei 79
 Schluff 99
 Schwämme 72, 92
 Schwarze Raucher **82 ff.**
 Schwarzes Meer 19, 96
 Schwefel 84
 Schwefelverbindungen **82 ff.**
 Schwefelwasserstoff 21, 96, 115
 Schwerkraftmessung 23
 Schwimmplattform 29 ff., 33 ff.
 Seamounts 74 ff.
 Sea Troll 30 ff.
 Sediment 100 ff.
 Sedimentwolke 71
 Seeberg 74 ff.
 seegangsunabhängiger Ölskimmer (SOS) 46
 Seegurken 72
 Seepocken 92
 Seerechtsübereinkommen (SRÜ) **120 ff., 132 ff.**
 Seesterne 72
 Seevögel 50
 Seismik **23 ff.**
 sekundäres Förderverfahren **26 ff.**
 Selen (Se) 56 ff.
 Seltenerdmetalle 54 ff.
 Seltenerdoxide 67 ff.
 Shear Rams 38 ff.
 Shell 49
 Shenhu-Becken 99
 Sibirien 99, 114
 Silber (Ag) 56 ff., 90 f.
 Simulationsprogramme 107 f.
- Singapur 41 ff.
 six pioneer states 124
 Slowakei 70
 Smartphone 54
 Solid-Expandable-Tubular-Verrohrung 25
 Sonangol 137
 SOPAC (Secretariat of the Pacific Community Applied Geoscience and Technology Division, eine Abteilung für angewandte Geowissenschaften und Technologie des Sekretariats der Pazifischen Gemeinschaft) 79 ff.
 Spar Buoys 31 ff.
 Sphalerit 82
 Spitzbergen 99
 Spülflüssigkeit 25 ff., 38 ff.
 Spülung mit Wasser 104 ff.
 Stahlplattformen 30 ff.
 Statische Reichweite **13**
 Stavanger 41
 Steuerrippen 25
 Stickstoffdüngerherstellung 11
 Stoppkartenprinzip 40
 Storegga-Rutschung 112
 Strandvorspülung 64 f.
 Straße von Malakka 46
 Streamer 109 f.
 Subduktion 83
 Subduktionszone 102, 111
 Subsea-Anlage 31 ff.
 Südafrika 59, 65
 Südamerika 60
 Sudan 91
 Südkorea 43 ff., 70, 89, 96 ff., 107, 124 f., 139
 Sulfat 84, 115
 Sulfatreduzierer 102
 Sulfide 82
 Suriname 19
 symbiontisch 90
- T
- Taeanhaean 43
 Taiwan 96 ff., 104 ff.
 Tankerunfälle 37 ff.
 Tansania 19
 Tellur (Te) 56 ff., 67 ff.
 Tenside 46
 Tension Leg Platforms 31 ff.
 tertiäres Förderverfahren **26 ff.**
 Thallium (Tl) 67 ff.
 The Area 122 ff.
 Thorium (Th) 67 ff.
 Tiefenpumpe 26
 Tiefsee **121**
 Tiefseekorallen 92
 Tiefstwasserbereich 17 ff.
 Tiefwasserbereich 17 ff.
 Timorsee 135
 Titan (Ti) 66 ff.
 Tobago-Feld 10
 Todorokit 68
 Ton 103
 Tonga 70
 Tonschiefer 20 ff.
 Tonsteine 20 ff.
 Torf 21
 Torrey Canyon 36
 Trail-Smelter-Fall 140
 Treibhauseffekt 112 ff.
 Tschechei 70
 Tsunami 112
 Tunesien 65
 Turbidit 102
- U
- Übereinkommen zur internationalen Haftung für durch Raumfahrzeuge verursachte Schäden (Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects) 141
 Überwachungsflüge 45
 UK Seabed Resources Limited 70
 Ullung-Becken 99, 107
 Umweltbeobachtungsprogramm 126
 Umweltmanagementplan (UMP) 128 ff.
 Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) 136 f.
 Umweltverträglichkeitsprüfung 112, 124
 United States Geological Survey (USGS) 98
 UN-Seerechtskonferenz 120 ff.
 Unterwasserroboter 40
 USA 11 ff., 46, 64, 130, 140
 US-Behörde für Sicherheit und Umweltrecht (Bureau of Safety and Environmental Enforcement, BSEE) 40
- US-Energieministerium (United States Department of Energy, DOE) 105
- V
- Vanadium (V) 56 ff., 67 ff.
 Venezuela 14
 Verfassung der Meere 120
 Vernadit 68
 Verölung **36 ff.**
 verschuldensunabhängige Staatenhaftung 140 ff.
 Verwesung 20 ff.
 Verwitterungsboden 59
 Vietnam 104
 Viskosität 27
 Völkergewohnheitsrecht 130, 140
 Vorsorgeansatz 126
 Vulkane **82 ff.**
 Vulnerable Marine Ecosystems (VME, schutzwürdiges Meeresökosystem) 65
- W
- Wasserstoffatome 97
 Wasserstoffbrückenbindung 97, 107
 Wasserstoffproduktion 11
 Wattenmeer 49
 Weißer Raucher 84
 Weltbank 57
 Westafrika 65, 136 f.
 Wiederkäuer 114
 Wirkungsgrad 12
 Wolfram (W) 67 ff.
- X
- Xenophyophoren 72, 80
- Y
- Yttrium (Y) 67 ff.
- Z
- Zement 38
 Zink 91
 Zink (Zn) 56 ff.
 Zinn (Sn) 56 ff.
 Zypern 19

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

Gesamtleitung: 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



Der „World Ocean Review“ ist eine einzigartige Publikation über den Zustand unserer Meere und spiegelt den aktuellen Stand der Wissenschaft wider. Sie ist hervorgegangen aus der Kooperation folgender Partner:



ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN

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 sieben Fakultäten der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, des GEOMAR Helmholtz Zentrums für Ozeanforschung Kiel, des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammenschlossen.



Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nicht-Regierungsorganisation 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.

