5 Energie und Rohstoffe aus dem Meer

> Heutzutage interessieren sich Industrie und Wirtschaft für eine breite Palette an Rohstoffen aus dem Ozean – angefangen von Sand, Erdöl und Erdgas bis hin zu den riesigen Erzvorkommen in der Tiefsee, deren industrieller Abbau derzeit vorbereitet wird. Zeitgleich treiben Staaten und Unternehmen den Ausbau der grünen Stromproduktion auf dem Meer voran. Aus Sicht des Ozeans bedeuten beide Entwicklungen vor allem eines: noch mehr großflächige Eingriffe des Menschen.

Tiefseebergbau: Die Pläne nehmen Gestalt an

> Seit mehr als 140 Jahren weiß der Mensch, dass in der Tiefsee der Ozeane wertvolle Rohstoffe wie Nickel, Kupfer, Kobalt und Seltene Erden lagern. Diese abzubauen aber war bislang technisch kaum möglich und zudem unrentabel. Mit dem Kampf gegen den Klimawandel steigt jedoch die Nachfrage nach diesen Metallen und Mineralien enorm, und es stellt sich die Frage, ob diese weiterhin nur an Land oder bald auch im Meer abgebaut werden. Erste Fördertests in der Tiefsee hat es bereits gegeben, allerdings sind die Folgen für die Umwelt noch nicht ausreichend erforscht.

Das Fundament des technologischen Fortschritts

Mobiltelefone, Internet und Streaming-TV sind mittlerweile genauso wenig aus unserem Alltag wegzudenken wie Autos mit E-Motor, Windkraftanlagen und der Batteriespeicher für den Strom aus der hauseigenen Photovoltaikanlage. Die zunehmende Digitalisierung und Elektrifizierung unseres Lebens haben jedoch ihren Preis. Für die Herstellung der notwendigen Technik und den Ausbau der Netze werden jede Menge Metalle und insbesondere jene aus der Gruppe der Seltenen Erden benötigt. Wolfram lässt Telefone vibrieren, Gallium und Indium sind für die Leuchtdiodentechnologie (LED) in Lampen erforderlich, Halbleiter brauchen Siliziummetall und Wasserstoffbrennzellen benötigen Metalle der Platingruppe.

Hinzu kommen mineralische Rohstoffe wie Kupfer, Nickel, Kobalt, Lithium und Tellur, die wie alle anderen auch in aufwendigen Bergbauverfahren dem Erdreich entnommen werden müssen. Im Zuge dessen wird in der Regel nicht nur die Umwelt in großem Ausmaß zerstört; in so manchen Ländern führt der Abbau von Rohstoffen auch zu Korruption, Krieg und Vertreibung mit schwerwiegenden Folgen für die einheimische Bevölkerung – vor allem, wenn der Bergbau auf unkontrollierte oder illegale Weise erfolgt.

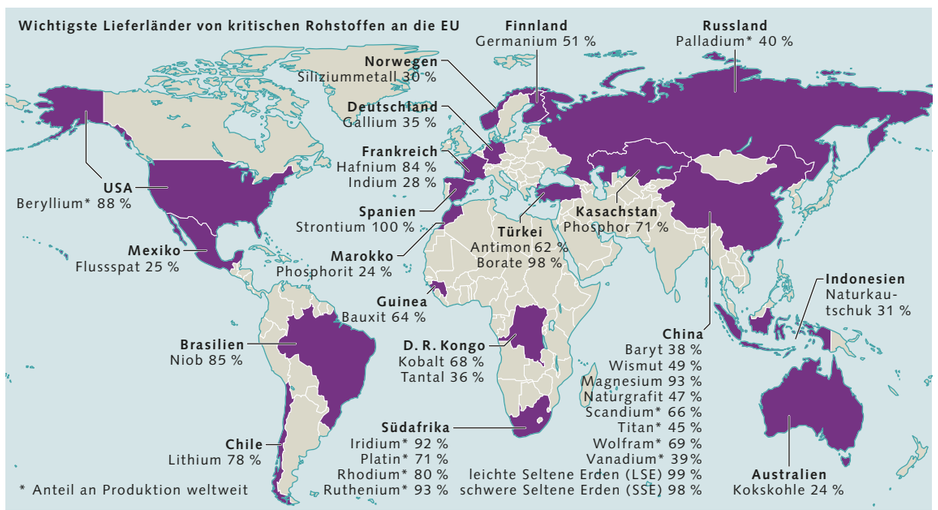
Diese Folgen wiegen umso schwerer, wenn man bedenkt, dass die Nachfrage nach diesen Metallen und Mineralien im Zuge der Klima-, Energie- und Verkehrswende steigen wird. Nur zwei Beispiele: Bereits heute ist absehbar, dass die Europäische Union im Jahr 2030 bis zu 18-mal mehr Lithium und fünfmal mehr Kobalt für die Herstellung von Elektrofahrzeugen und für die Energiespeicherung benötigen wird als im Jahr 2020. Die Nachfrage nach Seltenen Erden, die in Permanentmagneten, etwa für Elektrofahrzeuge, digitale Technologien oder Windgeneratoren zum Einsatz kommen, könnte sich nach Angaben der Europäischen Kommission bis 2050 verzehnfachen. Wie aber soll dieser steigende Bedarf gedeckt werden?

Bislang gibt es nur zwei Gebiete auf der Erde, in denen der Mensch bislang noch keinen kommerziellen Bergbau betreibt. Das eine Areal umfasst die Antarktis, also alle Gewässer und Landmassen südlich des 60. Breitengrades Süd. Für diese Region verbietet das Umweltschutzprotokoll zum Antarktisvertrag (Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty) sowohl den Abbau mineralischer Rohstoffe als auch die Förderung sogenannter Energierohstoffe. Zu Letzteren gehören fossile Rohstoffe wie etwa Kohle, Erdöl und Erdgas. Das zweite noch vom kommerziellen Bergbau verschonte Gebiet ist der Meeresboden in der Tiefsee – gemeint ist hier der Untergrund der Weltmeere in einer Wassertiefe von mehr als 200 Metern.

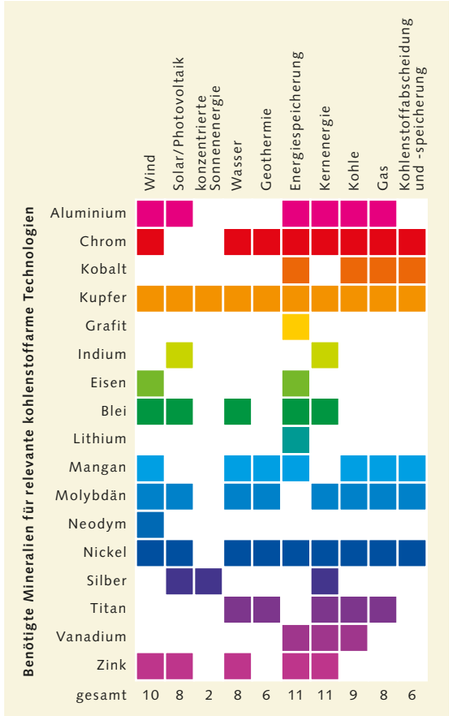
Die weltweit steigende Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen aber lässt die Ozeane zunehmend in den Fokus der Bergbauindustrie rücken. In der Tiefsee kommen nämlich gleich mehrere Metalle und auch Seltene Erden in kommerziell vielversprechenden Mengen vor. Geologen unterscheiden drei verschiedene Arten abbauwürdiger Tiefsee-Erzvorkommen, die im Gegensatz zu Lagerstätten an Land allesamt eine Vielzahl verschiedener Metalle enthalten: Manganknollen, kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten und sogenannte Massivsulfide.

Manganknollen

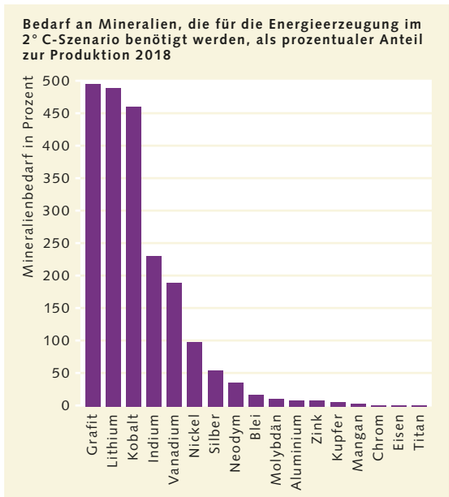
Als Manganknollen werden schwarzbraune, rundliche und meist zwiebelschalenartig aufgebaute mineralische Körper bezeichnet, die einen Durchmesser von ein bis 15 Zentimetern besitzen. Sie bilden sich in erster Linie in den von Sedimenten (Partikelablagerungen) bedeckten Tiefseeebenen der Ozeane in einer Wassertiefe von 3500 bis 6500 Metern. Für ihre Entstehung bedarf es sauerstoffreichen Tiefenwassers sowie eines Kerns oder eines Nukleus, an dem sich dann über einen Zeitraum von mehreren Millionen Jahren sowohl Eisen- und Manganoxide als auch zahlreiche Neben- und Spurenmetalle wie Nickel, Kobalt, Kupfer, Titan, Molybdän und Lithium in vielen Schichten anlagern.



5.1 > Die Europäische Union muss viele der in Europa benötigten kritischen Rohstoffe importieren und ist dabei auf Lieferungen aus einigen wenigen Ländern angewiesen. Besonders groß ist die Abhängigkeit von Nationen wie China (99 Prozent aller leichten Seltenen Erden) und der Türkei (98 Prozent der benötigten Borate).



5.2 > Die globale Energiewende kann nur gelingen, wenn ausreichend mineralische Rohstoffe vorhanden sind. Für den Bau von Windturbinen, Photovoltaikanlagen und Energiespeichern werden bis zu elf verschiedene Metalle benötigt.



5.3 > Will die Menschheit die Erderwärmung bis zum Jahr 2100 auf zwei Grad Celsius begrenzen, muss sie ihren Energiesektor komplett umbauen. Nach Angaben der Weltbank wird infolgedessen vor allem der Bedarf an Grafit, Lithium, Kobalt und Indium für die Herstellung von Energietechnologien bis zum Jahr 2050 deutlich ansteigen.

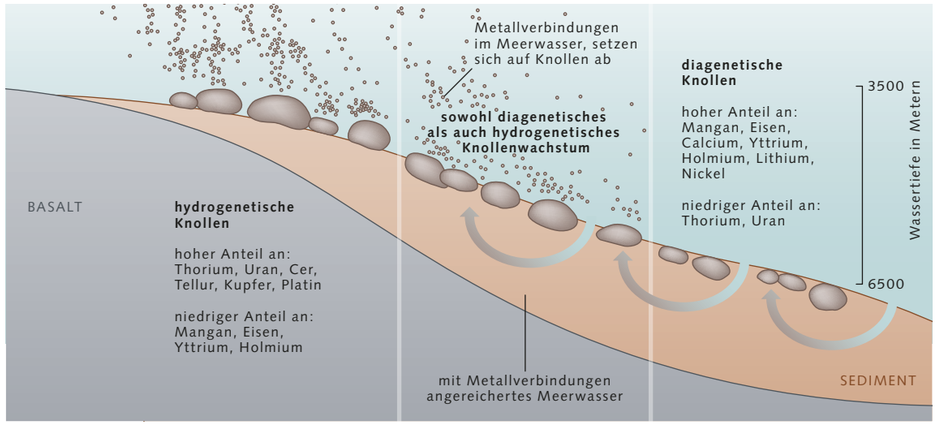
5.4 > Manganknollen wachsen, indem sich über einen Zeitraum von Jahrmillionen im Meer- oder Porenwasser gelöste Metalle in konzentrischen Ringen um einen Nukleus herum anlagern. Auf diese Weise entstehen ihre rundliche Form und der zwiebelschalenartige Aufbau.

Als Nukleus dient in der Regel ein Stück verfestigtes Sediment oder ein Knollenbruchstück, gelegentlich auch Basalt- und andere Gesteins- oder Muschelschalenbruchstücke. Wissenschaftler haben allerdings auch schon Knollen gefunden, die sich um den ausgefallenen Zahn eines Hais herum gebildet hatten oder deren Kern aus den Innenohrknöchelchen eines Wales bestand. Die Metalle wiederum sind auf natürliche Weise im Meerwasser und im Porenwasser der Sedimente gelöst und werden durch sogenannte diagenetische und hydrogenetische Prozesse auf den Manganknollen abgelagert.

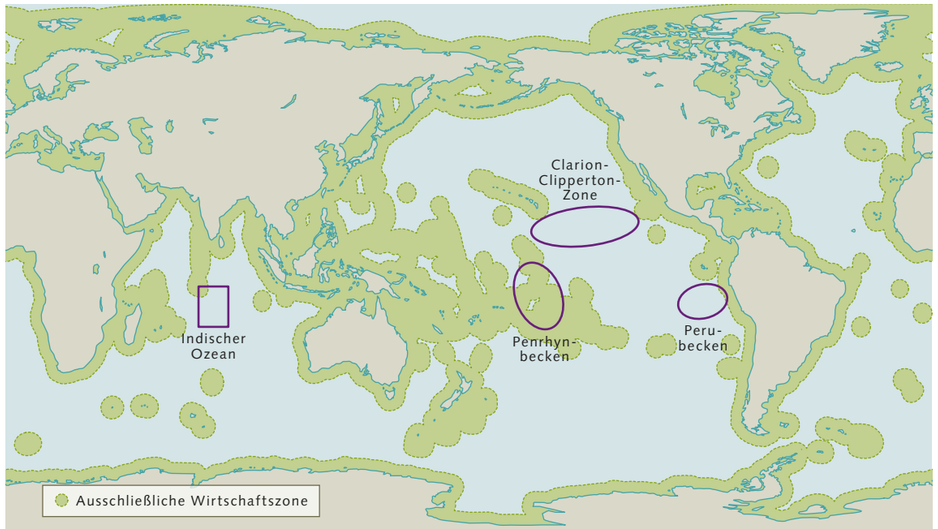
Bei der diagenetischen Anreicherung geschieht dies durch Ausfällung der Metalloxide aus dem sogenannten Porenwasser, welches durch die oberen Sedimentschichten des Meeresbodens zirkuliert. In diesem Porenwasser ist unter anderem Mangan gelöst, das infolge von Konzentrationsunterschieden nach oben diffundiert und aus dem Meeresboden austritt. Bei Kontakt mit dem sauerstoffreichen Ozeanwasser wird es oxidiert, was zur Ausfällung von Manganoxiden führt. Diese reichern sich dann in konzentrischen Ringen um den Nukleus an. Andere im Porenwasser gelöste Metalle, einschließlich Kupfer und Nickel, werden in das Manganoxid eingeschlossen. Sie stammen vor allem aus der mikrobiellen Zersetzung des organischen Materials im Meeresboden. Außerdem werden sie freigesetzt, wenn sich die im Sediment abgelagerten Kalk- oder Silikatschalen abgestorbenen Planktons auflösen. Manganknollen beziehen in der Regel mehr als 80 Prozent ihrer Metalle aus dem Porenwasser. Diese stete Materialzufuhr erlaubt ihnen, zu wachsen – allerdings nicht mehr als einige Zentimeter in einem Zeitraum von einer Million Jahre.

Die meisten Manganknollen wachsen aber auch infolge hydrogenetischer Prozesse, das heißt durch die Ausfällung sogenannter Kolloide (Teilchen mit einer Größe von einem Nanometer bis einem Mikrometer) aus hydratisierten Mangan- und Eisenoxiden direkt aus dem Meerwasser. Manganknollen, die nur oder größtenteils durch hydrogenetische Bildung entstehen, treten an Hängen oder Gipfeln untermeerischer Vulkane (englisch: seamounts) auf. Ihre Zusammensetzung wird durch die Chemie des Wassers und durch biogeochemische Prozesse zwischen Meerwasser und den darin enthaltenen Partikeln gesteuert. Hydrogenetisch gebildete Knollen wachsen sehr langsam. Ihr Durchmesser nimmt nur um einige Millimeter pro einer Million Jahre zu. Sie reichern jedoch mehr Kobalt und Seltene Erden an als Knollen diagenetischen Ursprungs.

Die Manganknollen liegen lose auf dem Meeresboden, meist zu ein bis zwei Dritteln im Sediment eingesunken. In einigen Gebieten finden sich nur einige wenige Knollen pro Quadratmeter Fläche; in anderen sind es bis zu 1000 Stück. Das größte und wirtschaftlich interessanteste Vorkommen befindet sich im sogenannten Manganknollengürtel der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ). Diese liegt im äquatornahen Bereich des Nordpazifiks, zwischen



5.5 > Manganknollen wachsen zum einen durch die Ausfällung von Metalloxiden aus dem Porenwasser der Meeressedimente (diagenetische Anreicherung), zum anderen durch die Ausfällung von Mangan- und Eisenoxiden direkt aus dem Meerwasser (hydrogenetische Anreicherung). Beide Prozesse können gleichzeitig stattfinden.



5.6 > Die wirtschaftlich interessantesten Manganknollenvorkommen befinden sich in der nordpazifischen Clarion-Clipperton-Zone, im Perubecken, im westpazifischen Penrhynbecken sowie im zentralen Indischen Ozean.

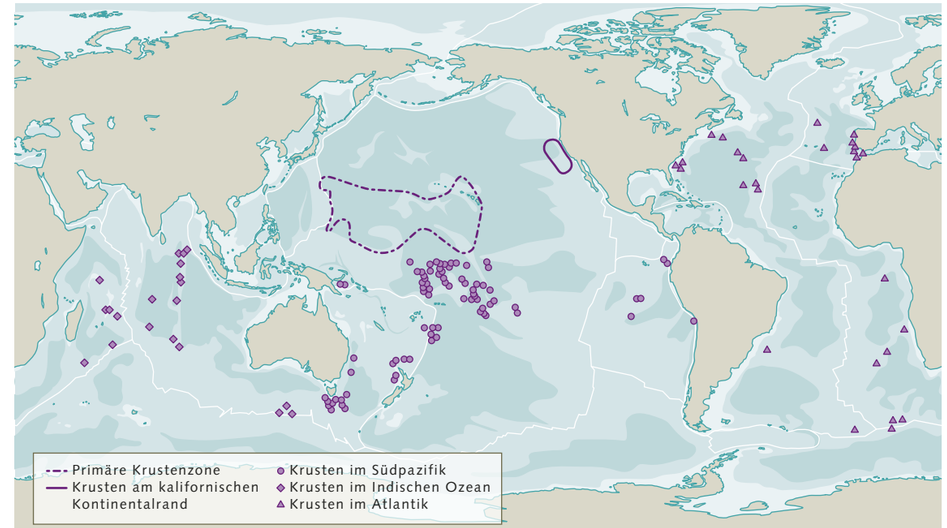
Hawaii und Mexiko. Andere bedeutende Manganknollenvorkommen finden sich im Perubecken (Südostpazifik), im Penrhynbecken (Westpazifik) sowie im zentralen Indischen Ozean.

Der pazifische Manganknollengürtel in der Clarion-Clipperton-Zone ist mit einer Fläche von etwa fünf Millionen Quadratkilometern (ca. 5000 Kilometer lang und 1000 Kilometer breit) größer als die Europäische Union. Etwa drei Viertel dieses Tiefseeareals bestehen aus flachem Meeresboden. Auf der restlichen Fläche ragen Unterseevulkane empor, einige in Höhen von bis zu 1000 Metern. In den Tiefseeebenen wiederum gibt es Gebiete, in denen nahezu ausschließlich große Knollen mit einem Durchmesser von vier bis 15 Zentimetern liegen, und andere, in denen fast alle Knollen kleiner als vier Zentimeter sind. Die kleinen Knollen bedecken etwa 85 Prozent der Tiefseeebenen in der Clarion-Clipperton-Zone. Gebiete mit großen Knollen machen rund zwölf Prozent aus, und die restlichen drei Prozent der Fläche sind frei von Knollen. In besonders knollenreichen Arealen liegen die Erzklumpen so dicht an dicht, dass sie pro Quadratmeter Fläche in der Regel ein Nassgewicht zwischen 15 und 30 Kilogramm auf die Waage bringen. Schätzungen zufolge lagern in der Clarion-Clipperton-Zone Knollenvorkommen mit einem Gesamtgewicht von 25 bis 40 Milliarden Tonnen Nassgewicht.

Wirtschaftliches Interesse erregen diese wegen ihres hohen Gehaltes an Mangan (30 Gewichtsprozent), Nickel (1,4 Gewichtsprozent), Kupfer (1,1 Gewichtsprozent) und Kobalt (0,2 Gewichtsprozent). Alle vier Metalle werden unter anderem für die Herstellung von Kommunikationstechnik sowie für die Stahlveredelung und die Herstellung von Elektroautos benötigt. Neben Nickel und Mangan ist vor allem Kobalt ein unverzichtbarer Bestandteil moderner Lithium-Batterien und wird bislang vor allem in der Republik Kongo abgebaut. Im Vergleich zu allen bekannten Lagerstätten an Land aber finden sich in den Manganknollen der Clarion-Clipperton-Zone allein etwa 3,4- bis fünfmal mehr Kobalt; 1,8- bis dreimal mehr Nickel und 1,2-mal mehr Mangan. Außerdem enthalten die Knollen vergleichsweise hohe Anteile der Spurenmetalle Titan, Molybdän und Lithium.

Kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten

Kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten sind harte Überzüge aus Eisen- und Manganoxiden, die sich auf den Hängen von Unterseevulkanen bilden und wie hydrogenetisch wachsende Manganknollen ihre Metalle überwiegend aus



5.7 > Eisen-Mangan-Krusten gibt es vor allem in jenen Meeresregionen, wo die ozeanische Kruste am ältesten ist und die Erzverkommen demzufolge am längsten wachsen konnten. Das ist zum Beispiel im Westpazifik der Fall.

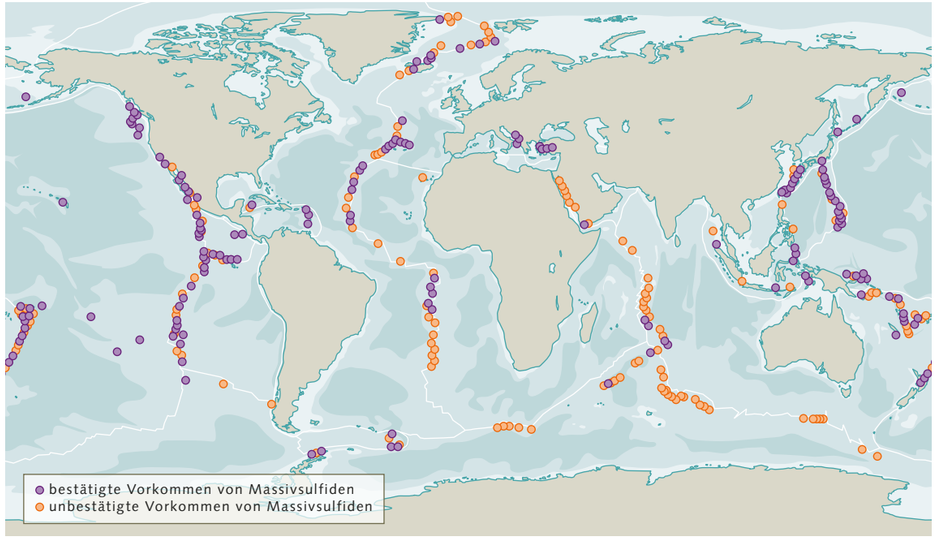
dem umgebenden Meerwasser aufnehmen. Im Gegensatz zu den flachen Tiefseeebenen lagert sich an den Vulkanhängen nämlich keine Sedimentschicht ab. Meeresströmungen spülen herabsinkende Partikel ziemlich schnell davon, sodass die Eisen-Mangan-Krusten nur äußerst langsam wachsen können – pro eine Million Jahre etwa ein bis fünf Millimeter.

In den Krusten reichern sich verschiedene Metalle an, die für die Herstellung moderner Energieversorgungs-, Computer- und Kommunikationssysteme benötigt werden. Dazu gehören Kobalt, Titan, Molybdän, Zirkon, Tellur, Bismut, Niob, Wolfram, Seltene Erden sowie Platin. Das seltene Halbmetall Tellur beispielsweise wird sowohl für die Cadmium-Tellur-Legierungen in der Dünnschichtphotovoltaik eingesetzt als auch für Bismut-Tellur-Legierungen in Computerchips.

Rund zwei Drittel der für den Tiefseebergbau interessanten Vorkommen kobaltreicher Eisen-Mangan-Krusten befinden sich im Pazifischen Ozean, 23 Prozent im Atlantik und rund elf Prozent im Indischen Ozean. Als wirtschaftlich interessant gelten Vorkommen in Wassertiefen von 800 bis 2500 Metern. Die bekannten Krusten sind in der Regel drei bis sechs Zentimeter dick, im Ausnahmefall auch mal bis zu 26 Zentimeter, sodass Experten von 60 bis 120 Kilogramm Erz pro Quadratmeter Hangfläche ausgehen. Das weltweite Gesamtvorkommen kobaltreicher Eisen-Mangan-Krusten wird auf 40 Milliarden Tonnen geschätzt, wobei nach bisherigem Stand des Wissens jedoch nur die Hälfte gewinnbringend abgebaut werden könnte. Detailliert untersucht sind bislang allerdings weit weniger als ein Zehntel der bekannten Vorkommen.

Massivsulfide

Als marine Massivsulfide (englisch: Seafloor Massive Sulfides) bezeichnet man Metall-Schwefel-Verbindungen (Metallsulfide), die an heißen Quellen am Meeresboden in Wassertiefen von 1600 bis 4000 Metern entstehen. Diese Hydrothermalvorkommen sind an vulkanische Strukturen gebunden und kommen daher vor allem an tektonischen Schwachstellen der Erdkruste vor – so zum Beispiel an Mittelozeanischen Rücken, in sogenannten Backarc-Spreizungszonen sowie an Inselbögen. Sie entstehen durch das Zirkulieren von Meerwasser durch die oberen drei Kilometer der ozeanischen Kruste. Das Meerwasser wird dabei durch tiefer liegende Wärmequellen (Magmakammern) aufgeheizt und verwandelt sich in eine heiße, saure und hochkonzentrierte Lösung, die Metalle aus den vulkanischen Gesteinen lösen kann.



5.8 > Massivsulfide bilden sich an heißen Quellen, die wiederum nur an tektonischen Schwachstellen der Erdkruste auftreten – so zum Beispiel an Mittelozeanischen Rücken, in sogenannten Back-arc-Spreizungszonen sowie an Inselbögen. Als abbaufähig gelten bislang nur die Erzvorkommen an erkalteten Hydrothermalquellen.

Die heiße Hydrothermallösung steigt anschließend an gewissen Stellen aus dem Meeresboden auf. Kommt sie in Kontakt mit dem kalten, sauerstoffreichen Meerwasser, werden die gelösten Metalle in Form von Metallsulfiden ausgefällt. Dazu gehören zum Beispiel Pyrit, Chalkopyrit und Sphalerit.

Durch das fokussierte, nach oben gerichtete Ausströmen der Hydrothermallösung an den heißen Quellen entstehen spektakuläre schornsteinartige Gebilde, die sogenannten Schwarzen Raucher (englisch: Black Smoker). Diese erreichen eine Höhe von 20, 30 oder sogar noch mehr Metern. Irgendwann aber werden die Schornsteine instabil und brechen zusammen; anschließend bildet sich ein neuer Schlot, der abermals in die Höhe wächst, bis auch dieser zusammenbricht. Durch diese stete Abfolge bilden sich Metallsulfidhügel am Meeresboden, die durch interne chemische Reaktionen bei der Vermischung der Hydrothermallösung mit eindringendem Meerwasser weiter verändert und verfestigt werden. Diese Erzvorkommen können bis zu mehrere Hundert Meter im Durchmesser und einige Zehner Meter dick werden. Darüber hinaus können die hydrothermalen Lösungen ihre Metallfracht aber auch unterhalb des Meeresbodens ausfällen. Sie bilden dann sogenannte Stockwerksvererzungen.

Die marinen Massivsulfide bilden das moderne Gegenstück zu den fossilen vulkanischen Massivsulfidlagerstätten an Land. Letztere sind wichtige Lieferanten für Kupfer, Zink, Blei, Silber und Gold. Die gleichen Metalle finden sich auch in den Massivsulfidlagerstätten am Meeresboden. Darüber hinaus enthalten die Vorkommen im Meer weitere Neben- und Spurenmetalle, die für moderne Hochtechnologieanwendungen wichtig sind. Dazu gehören Kobalt, Antimon, Indium, Selen, Tellur, Gallium, Germanium, Bismut und Molybdän.

Wissenschaftler kennen bislang mehr als 630 aktive Hydrothermalquellen, an denen sich nachweislich Metallsulfide anreichern. Allerdings setzen sich Hydrothermalfelder immer aus aktiven und inaktiven Bereichen zusammen. Inaktiv bedeutet hierbei, dass keinerlei hydrothermale Lösungen aus dem Meeresboden austreten. Für einen möglichen Abbau von Massivsulfiden kommen aus zwei Gründen nur diese inaktiven Bereiche infrage: Zum einen geht man bislang davon aus, dort weniger Gefahr zu laufen, seltene Ökosysteme der Tiefsee zu zerstören als an aktiven Quellen; zum anderen würden die in aktiven Bereichen austretenden, mehrere Hundert Grad Celsius heißen und stark sauren Lösungen wahrscheinlich die Abbaugeräte schnell beschädigen.

Bisher sind nur wenige ausschließlich inaktive Massivsulfidvorkommen bekannt. Dies liegt daran, dass inaktive Vorkommen viel schwieriger zu finden sind als die aktiven Quellen. Letztere können vergleichsweise leicht anhand der chemischen Signatur und der Partikel lokalisiert werden, welche die austretenden hydrothermalen Lösungen im umgebenden Meerwasser erzeugen.

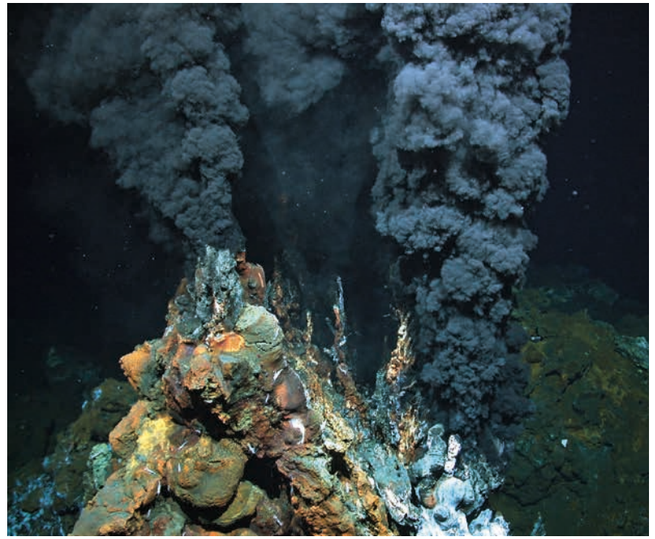
Wächterin über das Erbe der Menschheit

Rund 81 Prozent aller bekannten Manganknollenfelder, 46 Prozent der Eisen-Mangan-Krusten und 58 Prozent der Massivsulfide befinden sich in internationalen Gewässern und fallen somit nicht in die Zuständigkeit einzelner Nationen. Sie gehören stattdessen zum gemeinsamen Erbe der Menschheit, als welches Artikel 136 des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS) den Meeresboden außerhalb jeder Ausschließlichen Wirtschaftszone definiert.

Verwaltet wird dieses Erbe, das rund 42 Prozent der Erdoberfläche umfasst, von der Internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) mit Sitz in Kingston, Jamaika. Sie reguliert und überwacht alle Aktivitäten zur wirtschaftlichen Nutzung des internationalen Meeresbodens und dessen Untergrundes. Außerdem obliegt es der ISA, den im Seerecht verankerten Interessenausgleich zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern voranzubringen. Da bislang noch kein Tiefseebergbau im industriellen Maßstab stattfindet, bestehen ihre zwei Kernaufgaben derzeit darin, Lizenzen zur Exploration der Tiefseelagerstätten zu vergeben und zu überwachen sowie die Regeln zum künftigen Abbau zu erarbeiten und verabschiedete Rechtsgrundlagen stetig zu aktualisieren. Bis heute sind 167 Staaten und die Europäische Union der ISA beigetreten.

Einen Antrag auf eine Explorationslizenz können sowohl staatliche als auch private Unternehmen stellen. Voraussetzungen sind allerdings, dass der Antragsteller eine Gebühr von 500 000 US-Dollar zahlt und der Heimatstaat des Unternehmens – der sogenannte Sponsoring State – diesen Antrag unterstützt. Außerdem muss der Staat ein eigenes Meeresbergbaurecht verabschiedet und in Kraft gesetzt haben, mithilfe dessen er die Einhaltung der Lizenzpflichten sowie die finanzielle und technische Leistungsfähigkeit des Unternehmens jederzeit überprüfen kann. Die nationalen Regelungen zum Meeresbergbau dürfen dabei nicht hinter den internationalen Regelungen zurückstehen. Der Sponsoring State haftet nämlich für Tätigkeiten des von ihm unterstützten Lizenzinhabers. In Deutschland ist das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) mit Sitz in Hannover für die Überwachung der Explorationstätigkeiten zuständig.

Deutschland selbst besitzt durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Explorationslizenzen für zwei Gebiete in internationalen Gewässern. Die erste Lizenz gilt seit dem Jahr 2006 für die Erkundung von Vorkommen von Manganknollen. Das dazugehörige Gebiet besteht aus zwei Flächen, die sich beide in der Clarion-Clipperton-Zone im Pazifik befinden. Das erste Areal liegt im zentralen Bereich des Manganknollengürtels; eine zweite, etwa 60 000 Quadratkilometer große Fläche im östlichen Teil der Zone. Von Letzterer kommen etwa 20 Prozent des Gebietes für einen Abbau der Manganknollen infrage, weil nur dort der Meeresboden flach genug ist und die Knollen in ausreichend hoher Dichte vorkommen, sodass sich ein Abbau lohnen würde.



5.9 > Wo heiße Hydrothermallösung aus dem Meeresboden aufsteigt und sich mit kaltem, sauerstoffreichem Meerwasser vermischt, werden Metallsulfide ausgefällt. Diese lagern sich ab und bilden mit der Zeit spektakuläre schornsteinartige Gebilde, die sogenannten Schwarzen Raucher.

Die zweite deutsche Explorationslizenz umfasst ein 10 000 Quadratkilometer großes Tiefseegebiet am Zentralindischen und Südostindischen Rücken im südwestlichen Indischen Ozean, in dem viele Sulfidvorkommen vermutet werden. Geologinnen und Geologen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe führen seit dem Jahr 2015 gemeinsam mit Tiefseeexperten anderer deutscher Forschungsinstitute regelmäßig Expeditionen in das Lizenzgebiet durch, um den Umfang der jeweiligen Rohstofflagerstätten zu bestimmen sowie die Artenvielfalt und Auswirkungen eines möglichen Abbaus zu untersuchen. Im deutschen Lizenzgebiet haben sie mittlerweile zwölf Sulfidvorkommen mit 30 aktiven und 34 inaktiven Lokationen (zum Beispiel Sulfidhügel mit mehreren Schornsteinen) entdeckt. Durch chemisch-physikalische Untersuchungen der Wassersäule wurden zudem Hinweise auf zwölf weitere Vorkommen gefunden.

Aus Plänen wird langsam Wirklichkeit

Seit dem Jahr 2002 hat die Internationale Meeresbodenbehörde 31 Lizenzen zur Erkundung (Exploration) des Meeresbodens nach mineralischen Rohstoffen vergeben – 19 Lizenzen für die Exploration von Manganknollen in Gebieten von jeweils etwa 75 000 Quadratkilometern, einer Fläche etwas größer als das Bundesland Bayern; fünf Lizenzen für die Erkundung von Eisen-Mangan-Krusten auf einer Fläche von jeweils 3000 Quadratkilometern sowie sieben Lizenzen für die Exploration von Massivsulfiden auf Flächen von jeweils 10 000 Quadratkilometern. Fasst man alle Lizenzgebiete zusammen, hat die ISA bislang eine Meeresbodenfläche von rund 1,5 Millionen Quadratkilometern für die Rohstofferkundung freigegeben – ein Areal, das so groß ist wie Frankreich, Spanien und Deutschland zusammengenommen.

Jede Lizenz hat eine Laufzeit von 15 Jahren und enthält die Option, sie mehrfach um jeweils fünf Jahre zu verlängern, sofern der Lizenznehmer die Explorationsarbeiten aus unverschuldeten Gründen nicht beenden konnte (zum Beispiel aufgrund einer Pandemie) oder wenn die weltwirtschaftliche Lage gegen einen Rohstoffabbau in der Tiefsee spricht. Inhaber einer Explorationslizenz haben außerdem ein Vorrecht auf den späteren Abbau und dürfen Technik zur Rohstoffförderung in der Tiefsee testen. Dazu benötigen sie jedoch eine Umweltverträglichkeitserklärung, die von der Rechts- und Fachkommission der ISA geprüft und anerkannt wurde.

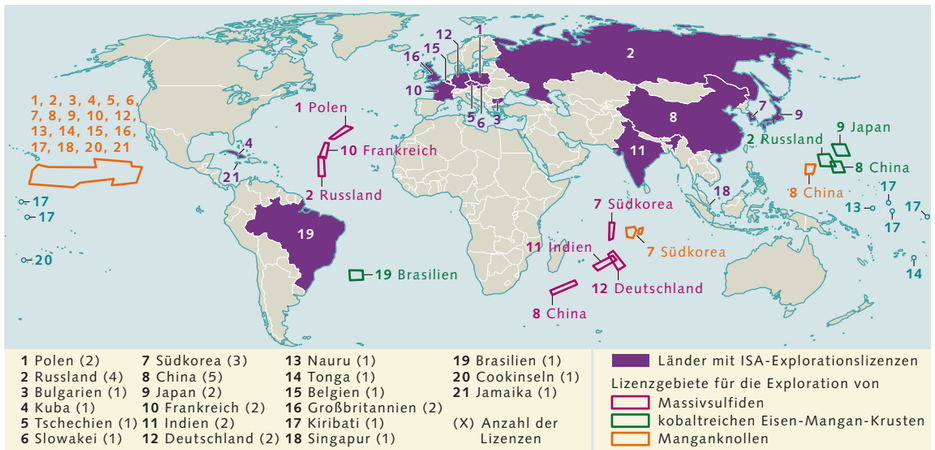
Technik für den Tiefseebergbau

MANGANKNOLLEN: Bislang gibt es noch keinen Manganknollenabbau. In den zurückliegenden zehn Jahren aber haben mindestens fünf verschiedene Unternehmen und staatliche Institutionen die technische Entwicklung vorangetrieben und erste in Größe und Gewicht noch verkleinerte Prototypen künftiger Abbaugeräte getestet. Das koreanische Forschungsinstitut KIOST beispielsweise hat einen Kollektor für Manganknollen sowie ein Fördersystem für den Transport der Knollen zur Meeresoberfläche entwickelt und beide bereits in Wassertiefen von 1200 und 1400 Metern getestet.

In eine Tiefe von 4400 Metern ging es im Jahr 2017 für das Fahrwerk des Manganknollen-Kollektors Patania I, den die belgische Firma DEME-GSR entwickelt und erfolgreich getestet hat. Sie besitzt eine Explorationslizenz in der Clarion-Clipperton-Zone und stellte ihren um ein Aufnahmesystem für Manganknollen erweiterten Kollektor Patania II im September 2018 erstmals der Öffentlichkeit vor. Ein erster Tiefseeeinsatz dieses Prototypen im Lizenzgebiet (ebenfalls 4400 Meter Wassertiefe) scheiterte im Jahr 2019 aufgrund technischer Probleme mit dem Verbindungskabel zum Schiff. Ein zweiter Test im Frühjahr 2021 aber verlief erfolgreich und wurde engmaschig von europäischen Forschern überwacht, um Informationen über die Auswirkungen des Knollenabbaus auf die Meeresumwelt zu sammeln und Beobachtungssysteme zu testen.

Sowohl der belgische als auch der südkoreanische Manganknollen-Kollektor sind vom Ansatz her raupenähnliche Fahrzeuge, die mithilfe eines hydraulischen Aufnahmesystems in der Lage sind, die lose auf dem Meeresboden liegenden Knollen einzusammeln. Der indische Lizenznehmer MoES dagegen verfolgt ein mechanisches Konzept zur Knollenaufnahme und entwickelt einen beweglichen Rechen mit Widerhaken, der die Knollen künftig zusammenharken soll. Nach der Aufnahme werden die Knollen gereinigt, zerkleinert und an ein vertikales Fördersystem übergeben. Je nach Konzept werden die Knollen dann über ein Lufthebeverfahren oder mithilfe von Dickstoffpumpen zur Förderplattform an der Wasseroberfläche transportiert. Dort werden sie entwässert und für den Transport an Land auf Massengutfrachter verladen.

KOBALTREICHE EISEN-MANGAN-KRUSTEN: Für den Abbau von Eisen-Mangan-Krusten hat die China Merchants Industry Holdings (CMI) einen Prototyp entwickelt, der im Südchinesischen Meer in 1300 Metern Wassertiefe erfolgreich getestet wurde. Das Gerät konnte sich nachweislich nicht nur auf dem Meeresboden bewegen, sondern auch Eisen-Mangan-Krusten schneiden und zerkleinern. Eisen-Mangan-Krusten vom Meeresuntergrund zu lösen, ist eine technische Herausforderung, denn oft bilden die Krusten die Oberflächengestalt des Untergrundgesteins nach. Befinden sich zum Beispiel Gerölle, abgerundete Blöcke und Gesteinsplatten oder die Fließstrukturen ehemaliger Lava unter den Krusten, so formen diese



5.10 > Seit dem Jahr 2002 hat die Internationale Meeresbodenbehörde 31 Lizenzen zur Erkundung des Meeresbodens nach mineralischen Rohstoffen vergeben: 19 Lizenzen für die Exploration von Manganknollen, fünf Lizenzen für die Erkundung von Eisen-Mangan-Krusten sowie sieben Lizenzen für die Exploration von Massivsulfiden.

5.11 > Zwölf Meter lang, 4,5 Meter hoch, vier Meter breit und 25 Tonnen schwer ist Patania II, ein raupenähnlicher Manganknollen-Kollektor der belgischen Firma DEME-GSR. Der Prototyp wurde im Frühjahr 2021 erstmals in der Clarion-Clipperton-Zone in 4500 Meter Wassertiefe getestet.

5.12 > Für den Abbau einer Massivsulfidlagerstätte in der Bismarcksee vor Papua-Neuguinea hatte die inzwischen insolvent gegangene kanadische Firma Nautilus Minerals drei ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge entwickelt: eine Fräse (rechts), einen Schüttgutschneider (Mitte) und einen Kollektor (links).

genau jene Strukturen nach. Auf besonders unebenem Grund können Abbaufahrzeuge demzufolge schnell stecken bleiben. Das chinesische Fahrzeug wiederum scheint sich schreitend fortzubewegen, um Unebenheiten auszugleichen. Für das Schneiden und Zerkleinern der Krusten setzen Ingenieure auf Verfahren mit einem Hochdruckwasserstrahl oder aber rotierende Rollenmeißel, wie man sie aus der Steinkohleförderung kennt.

MASSIVSULFIDE: Ebenso schwierig dürfte es sein, Massivsulfide abzubauen, doch auch hier gibt es bereits erste Ansätze. Die inzwischen insolvent gegangene kanadische Firma Nautilus Minerals beispielsweise hat für den Abbau einer Lagerstätte von Massivsulfiden in 1600 Meter Wassertiefe in der Bismarcksee vor Papua-Neuguinea ein Verfahren mit drei ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen entwickelt und diese auch bauen lassen. Der Fahrzeugpark besteht aus einer Fräse zur Einebnung des Meeresbodens, einem Schüttgutschneider (dem Hauptabbaufahrzeug) und einem Kollektor.

Fachleute bezweifeln jedoch, ob sich diese drei Fahrzeuge gleichzeitig sinnvoll einsetzen lassen. Die Fläche des anvisierten Erzvorkommens ist mit einem Durchmesser von wenigen Hundert Metern vergleichsweise klein. Außerdem besitzt die Lagerstätte die Form eines Kegels. Das heißt, ihre Fläche wird mit zunehmender Tiefe immer kleiner, wodurch die Bewegungsfreiheit der Abbaugeräte stark eingeschränkt wäre. Ein weiteres Hindernis sehen die Experten in dem harten vulkanischen Gestein, welches sich in der Umgebung der Massivsulfide befindet und abgetragen werden müsste. Nautilus Minerals wollte dazu eine Rollenmeißeltechnik einsetzen; Experten stufen dieses Verfahren jedoch als schwer durchführbar ein. Dennoch: Die Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) verfolgt einen vergleichbaren Ansatz. Das Unternehmen hat im Jahr 2017 einen ersten erfolgreichen Abbauversuch von Sulfiden im Okinawatrog im japanischen Hoheitsgebiet unternommen. Die Pläne zum marinen Bergbau im Okinawatrog sehen nach weiteren mehrjährigen Entwicklungs- und Erprobungsphasen eine Jahresproduktion von 1,3 Millionen Tonnen Erz vor.

Auf ein einzelnes Gerät zum Abbau von Massivsulfiden setzt ein Konsortium der deutschen Unternehmen Harren & Partner, Combi Lift und Bauer. Dessen Fachleute entwickeln ein vertikales Abbausystem, das auf dem Prinzip einer Schlitzwandfräse basiert, wie sie für rechteckförmige Gründungen im Tiefbau, aber auch im Pipeline-, Hafen- und Kanalbau angewendet wird. Die Schlitzwandfräse besteht aus einem Stahlrahmen mit gegenläufig rotierenden Schneidradtrommeln an der Unterseite. Eine solche Konstruktion wurde im Meer bereits erfolgreich für den Abbau von Diamanten in einer Wassertiefe von 165 Metern eingesetzt.

Mit dieser Methode könnte bei einem zukünftigen Sulfidabbau weitestgehend auf den Abraum des vulkanischen Nebengesteins verzichtet und der Förderprozess auf das Erz konzentriert werden. Die Technik würde es ermöglichen, an ausgewählten Stellen bis zu mehrere Dutzend Meter tief in die Massivsulfide zu schneiden und dabei nur einen sehr kleinen Abdruck von wenigen Quadratmetern pro Schnitt auf dem Meeresboden zu hinterlassen. Experten erwarten daher deutlich geringere Umweltauswirkungen. Es käme zum Beispiel kaum zur Freisetzung von Bohrklein oder Abraum am Meeresboden. Das heißt, es könnte ein gezielter Erzabbau am Meeresboden erfolgen, ohne eine nennenswerte Suspensionsfahne zu erzeugen. Außerdem entfällt die Installation eines vertikalen Förderstranges und damit der umweltschädliche Transport von Tiefenwasser an die Wasseroberfläche. Die Erprobung eines Prototyps dieses Gerätes im Testmaßstab in einer Wassertiefe von 2400 Metern ist im deutschen Lizenzgebiet im Indischen Ozean jedoch frühestens für das Jahr 2026 geplant.

Technische Entwicklung noch nicht am Ziel

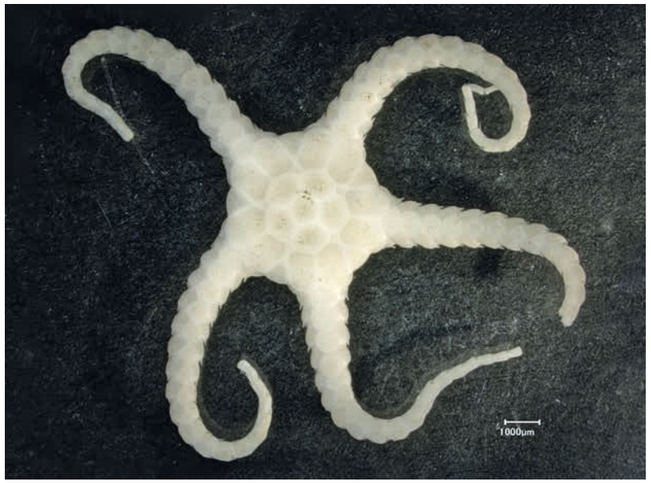
In der Theorie mögen all diese technischen Abbaukonzepte vergleichsweise einfach und machbar klingen; in der Praxis aber warten viele Herausforderungen, welchen die Abbautechnik dauerhaft standhalten muss. Dazu gehören unter anderem ein Wasserdruck von 400 bis 600 bar am Tiefseeboden, korrosives Salzwasser sowie Umgebungstemperaturen dicht am Gefrierpunkt. Die Fräsen, Knollenkollektoren und Fördersysteme sollten zudem über lange Zeiträume hinweg ohne Wartung auskommen, weil es einen großen Aufwand bedeuten würde, sie für Reparaturen an die Meeresoberfläche zu holen.

Alle bisherigen Testläufe wurden mit Prototypen im Kleinformat durchgeführt. Für eine Rohstoffförderung im industriellen Maßstab müssen nun Abbaugeräte in vier- bis fünffacher Größe gebaut und getestet werden. In den Kinderschuhen stecken auch noch Verfahren zur metallurgischen Verarbeitung von Manganknollen und -krusten. Ein weltweit erstes Konzept zur vollständigen Verhüttung und Nutzung von Manganknollen wurde von Wissenschaftlern der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie der Technischen Hochschule Aachen (RWTH) entwickelt und bereits im erweiterten Labormaßstab erfolgreich getestet. Derzeit überführen die Projektpartner das Verfahren in den industriellen Maßstab, um zum einen die Machbarkeit einer nahezu rückstandslosen metallurgischen Verarbeitung nachzuweisen. Zum anderen wollen die Fachleute herausfinden, wie ein Verhüttungswerk aussehen müsste und wie teuer es am Ende wäre, wirklich alle in den Manganknollen enthaltenen Rohstoffe zu extrahieren und zu verkaufsfähigen Zwischenprodukten zu verarbeiten.

Schätzungen zufolge werden die Kosten für die Aufbereitung und Verarbeitung der Knollen voraussichtlich die Hälfte bis zwei Drittel der gesamten Investitions- und Betriebskosten eines Tiefseebergbauprojektes umfassen. Die Investitionskosten belaufen sich auf etwa 1,5 Milliarden US-Dollar – eine Summe, die auch für die Erschließung landgebundener Vorkommen anzusetzen ist. Die Betriebskosten betragen schätzungsweise 160 bis 400 Millionen US-Dollar pro Jahr, was den Tiefseebergbau angesichts der gegenwärtigen Weltmarktpreise für Metalle vermutlich noch unrentabel macht. Die steigende Rohstoffnachfrage dürfte das Preisniveau jedoch langfristig anheben. Aufgrund dieser finanziellen und der genannten technischen Unwägbarkeiten gehen Experten davon aus, dass es mindestens weitere fünf, eher zehn Jahre dauern wird, bis marine mineralische Rohstoffe erstmals im großen Stil abgebaut werden könnten. Wie realistisch diese Annahme ist, bleibt abzuwarten.

Fortschritt oder schmutziges Geschäft?

Die zunehmende technische Machbarkeit des Tiefseebergbaus hat dazu geführt, dass der Streit über die Sinnhaftigkeit und Nachhaltigkeit der Förderung von Erzvorkommen im Meer neu entbrannt ist. Befürworter argumentieren, dass der Rohstoffbedarf der Menschheit angesichts der Umstellung von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energien (Stromspeicher, E-Mobilität) enorm steige. Würden die Staaten diese Nachfrage nicht befriedigen, wären ihre wirtschaftliche Entwicklung und der



5.13 > Der Schlangenstern *Amphiophiura bullata* ist eine von mehreren neuen Tiefseearten, die Forschende in den zurückliegenden Jahren in der Clarion-Clipperton-Zone entdeckt haben. Genetische Analysen ergaben zudem, dass einige der bislang unbekannten Schlangensterne zu neuen Abstammungslinien gehören, die sich seit mehr als 70 Millionen Jahren in der Tiefsee entwickelt haben.

Wohlstand ihrer Bevölkerung in Gefahr. Um den Rohstoffbedarf zu decken, müssten bestehende Bergwerkskapazitäten an Land ausgebaut oder aber neue Bergwerke eröffnet werden. Beide Maßnahmen wären mit großen Umweltauswirkungen verbunden. Unterstützer des Tiefseebergbaus verweisen daher darauf, dass:

- für den Tiefseebergbau keine Wälder gerodet, Grundwasserspiegel gesenkt und Menschen umgesiedelt oder vertrieben werden müssten; man bräuchte zudem keine aufwendigen Infrastrukturen wie etwa Straßen, Stromtrassen, Gebäude und Systeme für die Entwässerung;
- keine großen Abraumhalden entstünden, weil die Erzvorkommen direkt zugänglich wären – und nicht erst viele Tonnen Erdreich umgeschichtet werden müssten;
- beim Abbau im Meer keine Schadstoffe oder Schwermetalle freigesetzt würden, welche beim Erzabbau an Land oftmals zu großen Umweltschäden führen;
- Lagerstätten in der Tiefsee wie Manganknollen oftmals drei oder mehr Metalle in wirtschaftlich interessanten Mengen vereinen und somit verschiedene Rohstoffe an ein und demselben Ort abgebaut werden könnten; an Land müsste für jedes Metall eine eigene Lagerstätte erschlossen werden;
- nur Maschinen den Rohstoffabbau im Meer bewältigen könnten; im Gegensatz zum Bergbau an Land bestünden somit deutlich geringere Gefahren für Minenarbeiter; Kinderarbeit, die vor allem in Entwicklungsländern noch Alltag ist, könnte ausgeschlossen werden;
- der Abbau mariner Vorkommen die zunehmende Angebotskonzentration auf den internationalen Rohstoffmärkten entspannen würde. Bei vielen Metallen stammt ein Großteil der Produktion aus nur einem Land – teilweise auch aus politisch instabilen oder undemokratischen Staaten, die ihre Marktmacht als politisches Druckmittel einsetzen. Rohstoffe aus der Tiefsee würden die Abhängigkeit von diesen Nationen verringern, da ihr Abbau in internationalen Gewässern internationalem Recht unterliegt und damit auch der Kontrolle der Weltgemeinschaft.

Die Gegner des Tiefseebergbaus überzeugt diese Argumentation wenig. Sie sorgen sich zum einen um die Umweltauswirkungen der Rohstoffförderung in der Tiefsee. Zum anderen kritisieren sie die Rolle und Regelungen der Internationalen Meeresbodenbehörde und bezweifeln, dass die Einnahmen aus dem Verkauf des gemeinsamen Erbes der Menschheit vor allem auch den Menschen aus den ärmsten Entwicklungsländern zugutekämen.

Auswirkungen auf die Meeresumwelt

Über die möglichen Folgen des Tiefseebergbaus für die Artenvielfalt und die Lebensgemeinschaften am Meeresgrund ist nach 30 Jahren Forschung bereits einiges bekannt, auch wenn Forschende die Funktionsweise der Ökosysteme der Tiefsee und deren Rolle für die vielen Dienstleistungen des Meeres noch nicht vollständig ergründet haben. Auf und im Boden der an Manganknollen reichen Tiefseeebenen beispielsweise lebt eine Vielzahl beweglicher und sesshafter Organismen – angefangen bei wenige Zehntel Millimeter kleinen Fadenwürmern, die den Hauptteil der Artenvielfalt ausmachen, über Seegurken bis hin zu meterlangen Fischen. Auf den Knollen wachsen Schwämme und Tiefseekorallen, die vielen anderen Tieren Nahrung und Schutz bieten.

5.14 > Die Meeresschnecke *Chrysomallon squamiferum* ist die erste Tiefseeart, die aufgrund bevorstehender Bergbauarbeiten zur Roten Liste der gefährdeten Tierarten hinzugefügt wurde. Die Schnecke lebt an drei Hydrothermalquellen östlich Madagaskars. Zwei davon liegen in Gebieten, für die bereits Explorationslizenzen vergeben wurden.

5.15 > Kraken gehören zu den vielen Tiefseebewohnern, die unmittelbar auf Manganknollen angewiesen sind. Sie heften ihre Gelege an Schwämme, die auf den Manganknollen wachsen.

Wer wo am Meeresboden lebt, hängt von den jeweiligen Bedingungen am Meeresboden ab. Im deutschen Lizenzgebiet in der Clarion-Clipperton-Zone beispielsweise können sich die sedimentologischen und geochemischen Bedingungen am Meeresgrund über Entfernungen von weniger als 1000 Metern ändern. Außerdem durchsetzen Unterseevulkane und Hügelketten die großen Tiefseeebenen. Entsprechend angepasst sind dann auch die jeweiligen Lebensgemeinschaften.

Die Vielfalt des Lebens in der Tiefsee ist viel größer als ursprünglich gedacht. In den zurückliegenden Jahren haben Wissenschaftler nicht nur zahlreiche Arten aus der Clarion-Clipperton-Zone identifizieren und beschreiben können. Es gelang ihnen auch, mithilfe molekulargenetischer Untersuchungsmethoden einen ersten Eindruck von der Diversität der Tiefseeorganismen zu gewinnen. Diese ist so hoch, dass gern Vergleiche mit der Artenvielfalt von Regenwäldern angestellt werden. Allerdings ist die Individuendichte der meisten Arten am Meeresgrund gering, weshalb bislang nur geschätzte zehn Prozent der kleinsten Lebewesen (Meiofauna, bodenlebende Organismen, die 0,32 bis 1,0 Millimeter klein sind) und 30 Prozent der mittelgroßen Tiere (Makrofauna, Körpergröße von zwei bis 20 Millimeter) wissenschaftlich beschrieben wurden.

Bekannt sind dagegen die aus menschlicher Sicht unwirtlichen Lebensbedingungen in der Tiefsee, an die sich deren Bewohner angepasst haben: Nahrung gibt es nur selten; der Wasserdruck ist hoch, die Wassertemperatur dagegen niedrig. Außerdem ist es rund um die Uhr stockdunkel. Die meisten Organismen ernähren sich von den wenigen Partikeln, die aus den oberen Meeresschichten herabsinken. Das spärliche und vor allem kurzfristig verfügbare Nahrungsangebot nach dem Absinken von Planktonblüten im Oberflächenwasser führt dazu, dass die Tiere am Meeresgrund langsam wachsen, sich erst sehr spät im Leben fortpflanzen und unter Umständen extrem lange Brutpflege betreiben.

Im Zeitraum von 2007 bis 2011 beispielsweise beobachteten US-amerikanische Wissenschaftler vor der Küste Kaliforniens ein Tiefseekraken-Weibchen der Art *Graneledone boreopacifica*, dessen Nachwuchs erst aus dem Ei schlüpfte, nachdem es sein Gelege viereinhalb Jahre lang bewacht hatte. Wenig später wiederum konnten deutsche Tiefseeforscher im Perubecken nachweisen, dass Tiefseekraken ihre Gelege auch direkt an Manganknollen legen. Die Tiere hatten ihre Eier in einer Tiefe von rund 4000 Metern an Schwämme geheftet, die auf den Manganknollen wuchsen.

Andere Forscher fanden heraus, dass im östlichen Teil der Clarion-Clipperton-Zone in etwa jeder zweite Tiefseebewohner mit einer Größe von mehr als zwei Zentimetern (Megafauna) auf die Manganknollen angewiesen ist, weil diese den nahezu einzigen harten Untersatz bilden, auf dem sich Schwämme, Korallen & Co festsetzen können. Sollten die Knollen durch riesige Förderraupen abgebaut werden, würde dort anschließend das Substrat für eine Wiederbesiedlung fehlen – es sei denn, der Mensch führt Restaurationsmaßnahmen durch und ersetzt die Knollen durch andere Hartsubstrate. Aktuell prüfen europäische Forschende mit einer Reihe von Experimenten die Machbarkeit solcher Maßnahmen.

Größere Organismen kommen in der Clarion-Clipperton-Zone vergleichsweise selten vor. Bei Zählungen fanden Forscher gerade mal 0,5 Tiere pro Quadratmeter Fläche. Viel häufiger sind die hauptsächlich im Sediment lebenden Kleinsttiere (Mikrofauna, kleiner als 0,3 Millimeter). Sie machen mit einer durchschnittlichen Dichte von rund 300 000 Organismen pro Quadratmeter bei Weitem den Hauptbestandteil der Tiere aus. Bei einem Abbau würden allerdings nicht nur die Knollen selbst entfernt, sondern auch die oberen etwa zehn Zentimeter des Meeresbodens samt allen darauf oder darin lebenden Organismen. Wie lange die Natur anschließend bräuchte, um sich von diesem massiven Eingriff zu erholen, ist nur in Ansätzen bekannt.

In sogenannten Störungsexperimenten konnten Wissenschaftler zeigen, dass Eingriffe in das Leben am Tiefseeboden lang anhaltende, aber durchaus verschiedene Veränderungen in der Häufigkeit und Zusammensetzung der Tiere nach sich ziehen. Um den Manganknollenabbau zu simulieren, hatten Wissenschaftler beispielsweise im Jahr 1989 im Perubecken den Tiefseeboden auf einer Fläche von wenigen Quadratkilometern mit einer Egge umgepflügt. 26 Jahre später kehrten sie zurück, um das Leben auf und im umgepflügten Boden zu untersuchen. Ihr Ergebnis: Die Spuren waren noch immer deutlich zu sehen. Die biogeochemischen Bedingungen im Meeresboden hatten sich verändert, sodass überraschenderweise sogar die dort lebenden Mikroorganismen noch stark beeinträchtigt waren und laut Prognose mindestens 50 Jahre bräuchten, um sich nahezu vollständig zu erholen.

Eine Überblicksstudie aus der Clarion-Clipperton-Zone wiederum kam zum Schluss, dass nach einem Eingriff einige im Sediment lebende Arten schnell, das heißt innerhalb von Monaten bis Jahren, wieder einwandern und in ihrer Individuenzahl den ursprünglichen Zustand sogar übertreffen, während andere Arten Jahrzehnte und damit deutlich länger brauchen. Experten ziehen daher das Fazit, dass die Wiederbesiedlung gestörter Flächen viele Generationen dauern kann. Die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft am und im Meeresboden bleibt auch Jahrzehnte nach dem Ereignis verändert, wobei sich jedoch die Forschungsergebnisse aus einem bestimmten Gebiet nicht übertragen lassen – weder auf andere Tiefseeregionen noch auf andere Mineralvorkommen (Sulfide, Krusten) im Meer.

Abgesehen vom Abtragen der obersten Meeresbodenschicht erwarten Experten allerdings noch weitere Umweltauswirkungen der bislang entwickelten Abbauverfahren für Manganknollen. Zum einen wären da Störungen durch den Lärm, die Vibrationen und den Lichtschein der riesigen Förderraupen. Zum anderen ist abzusehen, dass durch das Einsammeln der Manganknollen sowie durch das Reinigen und den Abtransport des Erzes Sediment- oder Trübewolken vor allem am Meeresboden, aber auch in der Wassersäule entstehen werden. Forscher gehen davon aus, dass die derzeit in Bau befindlichen hydraulischen Knollenkollektoren pro Stunde 500 bis 1000 Tonnen Sediment am Meeresboden aufwirbeln werden. Diese Menge an Material wird vor allem dann zum Problem, wenn es sich wieder absetzt. Unter natürlichen Bedingungen beträgt die Sedimentationsrate in der Tiefsee nämlich nur wenige Millimeter pro 1000 Jahre. Die Aufwirbelungen durch den Knollenabbau aber würden diese Rate drastisch in die Höhe schnellen lassen.

Aus Versuchen und Computerberechnungen weiß man bereits, dass sich 90 bis 95 Prozent der durch die Förderraupen aufgewirbelten Sedimente in einem Umkreis von bis zu zehn Kilometern zügig wieder absetzen. Allerdings hat die neu gebildete Sedimentoberfläche eine andere Struktur und Zusammensetzung als der ursprüngliche Meeresboden und entspricht deshalb nicht mehr dem natürlichen Lebensraum. Die restlichen Partikel werden durch Meeresströmungen verdriftet und außerhalb des Abbaugebietes abgelagert. Experten gehen davon aus, dass ein industrieller Abbau der Manganknollen auch in 20 oder 30 Kilometer Entfernung zu deutlich erhöhten Sedimentationsraten führen wird.

Die Auswirkungen dieser Trübewolken und Sedimentablagerungen auf die Lebensgemeinschaften der Tiefsee

sind wahrscheinlich von Art zu Art unterschiedlich und bisher nur unzureichend erforscht. Erste Untersuchungen dazu zeigen, dass die Kleinsttiere im Sediment eine bis zu ein Zentimeter dicke Wiederbedeckung mit aufgewirbeltem Sediment vertragen. Ist diese Sedimentlage dicker, überleben weniger Tiere. Sesshafte Tiere wie Schwämme und Korallen hingegen, die in unmittelbarer Nähe zum Abbaugebiet auf dem Meeresboden siedeln und für ihre Ernährung das sonst sehr klare Bodenwasser filtrieren, werden durch die Masse der herabsinkenden Sedimentpartikel bedeckt und haben deshalb nur geringe Überlebenschancen. Aber auch Kraken, Fische und die Larven vieler anderer Tiefseearten könnten unter den Sedimentwolken leiden. Wissenschaftler können zudem nicht ausschließen, dass tiefseebergbaubedingte Trübewolken die Fischerei beeinträchtigen.

Das Fazit der Wissenschaft lautet daher in Kürze: Da bis heute kein Tiefseebergbau in industriellem Maßstab stattgefunden hat und entsprechende Begleituntersuchungen fehlen, können auch noch keine realistischen Angaben zur tatsächlichen Intensität und Dauer des störenden Eingriffes sowie zu seinen Langzeitfolgen für die Lebensgemeinschaften der Tiefsee gemacht werden. Aufsichtsgremien wie die Internationale Meeresbodenbehörde haben daher nur die Möglichkeit, Regularien einzuführen, welche die Folgen von Anfang an so weit wie möglich eingrenzen. Die Minimierung großflächiger Konsequenzen erfordert die Entwicklung von Geräten mit geringen Auswirkungen und eine sorgfältige und anpassungsfähige Raumplanung für den Bergbau. Das aktuelle Wissen reicht jedoch noch nicht aus, um wirksame Schutzvorkehrungen zu treffen. Viele Gebiete der Tiefsee gelten nach wie vor als unentdeckt. Außerdem kann niemand genau sagen, welche Rolle die unterste Etage des Ozeans beispielsweise für die vielen Stoffkreisläufe der Meere und damit letztendlich auch für das Klima der Erde spielt.

Die Internationale Meeresbodenbehörde begegnet diesem Wissensdefizit, indem sie die Einhaltung des **Vorsorgeprinzips** und höchster Umweltstandards verlangt sowie regionale Umweltmanagementpläne erstellt. In der Clarion-Clipperton-Zone hat sie zum Schutz der Artenvielfalt zudem neun jeweils 160 000 Quadratkilometer große Schutzgebiete am Meeresboden eingerichtet, also rund 30 Prozent der Gesamtfläche. Allerdings ist wissenschaftlich noch nicht nachgewiesen, ob deren Fläche, Lage und Artenvielfalt ausreichen würde, gestörte Abbauflächen wieder zu besiedeln. Aus diesem Grund diskutiert die Rechts- und Fachkommission der ISA derzeit, ob weitere drei bis vier Schutzgebiete eingerichtet werden sollen, die bislang nicht berücksichtigte Lebensräume einschließen. Darüber hinaus wird international verhandelt, wo entsprechende Schutzzonen in allen anderen rohstoffreichen Gebieten auf Hoher See eingerichtet werden sollen und welche Pflichten sich dadurch für die Lizenzinhaber ergeben. Das oberste Ziel ist es, verbindliche Regularien zur sorgsamen und anpassungsfähigen Raumplanung des Tiefseebergbaus zu schaffen und effektive Umweltschutzmaßnahmen auf regionaler Ebene zu treffen.

Kritik an der Internationalen Meeresbodenbehörde

Umweltschützer bezweifeln allerdings, dass die ISA ihrer Mehrfachrolle als Lizenzgeber, Bergbau-Wegbereiter, Abgabeneintreiber und oberste Kontroll- und Umweltschutzinstanz wirklich gerecht werden kann. Um alle Aufgaben ordnungsgemäß zu erledigen, seien die ISA-Gremien, vor allem aber ihr Schlüsselorgan, die Rechts- und Fachkommission, die für juristische und technisch-wissenschaftliche Fragen zuständig ist, mit viel zu wenig Mitteln und Fachpersonal für Umweltfragen ausgestattet. Außerdem gebe es fundamentale Interessenkonflikte innerhalb der Behörde, die aus den unterschiedlichen Anforderungen resultieren. Wie beispielsweise solle eine Behörde die Umwelt effektiv schützen, wenn sie gleichzeitig daran gemessen werde, in welchem Maß sie Tiefseebergbau ermögliche?

Die Umweltschutzorganisation Greenpeace wirft der ISA vor, Explorationslizenzen an verschiedene Unternehmen vergeben zu haben, die im Auftrag einiger weniger Gesellschaften aus Industrienationen agieren. Ein anschließender möglicher Tiefseebergbau in internationalen Gewässern käme so vor allem diesen Unternehmen zugute. Die vielen Risiken des Rohstoffabbaus wiederum würden vor allem Entwicklungsländer tragen: zum einen, weil diese als Sponsoring State der privaten Bergbauunternehmen auftreten; zum anderen, weil große Erzvorkommen in deren nationalen Gewässern liegen. Über deren Abbau hat die ISA nicht zu entscheiden, aber denkbare Bergbaufolgeschäden wie ein Zusammenbruch der Ökosysteme oder aber Auswirkungen auf die Fischerei würden somit in erster Linie die Küstenbevölkerung dieser Nationen treffen.

Andere Experten widersprechen Greenpeace: Vor allem bei Massivsulfiden und Eisen-Mangan-Krusten gebe es derzeit keine privaten Investoren und auch bei den Manganknollen seien etwa die Hälfte staatliche Lizenznehmer aus Industrie- und Entwicklungsländern. Firmen, die in internationalen Gewässern Bergbau betreiben wollen, müssten sich zudem gegen Umweltschäden versichern und in einen Umweltkompensationsfonds einzahlen. Hinsichtlich der Kritik an der ISA wird darauf verwiesen, dass die Behörde selbst alle Mitgliedstaaten auffordert, weitere Fachleute zu entsenden, um die Umweltexpertise der Kommission zu stärken.

Diese Experten loben auch die internationale Zusammenarbeit in der ISA und die Fortschritte, welche die Meeresbodenbehörde in den zurückliegenden Jahren gemacht habe. Im Juli 2000 wurden die Rechtsgrundlagen zur Prospektion und Erkundung der Manganknollen verabschiedet; im Mai 2010 wiederum folgte das Regelwerk für Massivsulfide und im Juli 2012 jenes für Eisen-Mangan-Krusten. Seit Juli 2016 verhandeln die ISA-Mitgliedstaaten nun die Abbauregularien, die Teil des sogenannten Mining Code sein werden – ein übergreifendes Regelwerk zur Erkundung und zum industriellen Rohstoffabbau, welches nach Ansicht vieler Beobachter die seltene Gelegenheit bietet, bereits im Vorfeld tatsächlicher Bergbauaktivitäten wissenschaftsbasierte Umweltschutzmaßnahmen festzulegen.

Der Mining Code reguliert die formalen Aspekte der Antragstellung, den Schutz der Umwelt über Umweltverträglichkeitserklärungen inklusive Umweltmanagement und -monitoring sowie die Öffentlichkeitsbeteiligung, den Arbeitsschutz, die Überwachung des Abbaus durch Inspektoren und den Stilllegungsplan. Außerdem soll in dem Regelwerk festgeschrieben werden, welche Gebühren und Kompensationsabgaben Bergbauunternehmen an die ISA zahlen müssen, wenn sie Rohstoffe aus internationalen Gewässern abbauen und somit allein vom gemeinsamen Erbe der Menschheit profitieren. Daran knüpft sich dann unmittelbar die Frage, wie die möglichen Einnahmen gerecht auf alle Länder verteilt werden könnten. Das Seerechtsübereinkommen enthält nämlich die wichtige Klausel, dass der Rohstoffabbau im Meer der Förderung an Land nicht schaden dürfe. Sollten einer oder mehreren Nationen dennoch Nachteile aus dem Tiefseebergbau entstehen – etwa, weil aufgrund dessen die Rohstoffpreise sinken oder deren Erzvorkommen dann nicht mehr ausgebeutet werden und dem Staat somit Steuereinnahmen entgehen –, so müssten diese nach dem Seerechtsübereinkommen finanziell durch die ISA entschädigt werden. Wie und von wem, ist bisher ebenfalls noch nicht abschließend geklärt.

Kreislaufwirtschaft plus X – die bessere Alternative

Ob der industrielle Tiefseebergbau eines Tages Wirklichkeit wird, bleibt abzuwarten. Umweltschützer fordern ein generelles Verbot und den flächendeckenden Schutz der Tiefsee; Unternehmen und Regierungen wiederum argumentieren mit der steigenden Rohstoffnachfrage und der Notwendigkeit, die Rohstoffversorgung ihrer jeweiligen Industrie und damit auch Arbeitsplätze zu sichern. Bei all dem schwingt außerdem die Angst mit, dass einzelne rohstoffreiche Nationen eine zu große Marktmacht erhalten und diese für eine politische Einflussnahme nutzen könnten. Ein denkbarer Ausweg aus dieser Zwickmühle wäre eine Kombination verschiedener Strategien, die jedoch voraussetzt, dass sich das globale Wirtschaftssystem und das Konsumentenverhalten grundlegend ändern und beide nicht mehr ausschließlich auf Wachstum und Verbrauch angelegt sind.

Am Anfang stünde dabei immer eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Diese setzt unter anderem voraus, dass:

- genügend Metalle in der Kreislaufwirtschaft enthalten sind, um den Bedarf zu decken;
- Produkte so weiterentwickelt werden, dass bei ihrer Herstellung möglichst wenig mineralische Rohstoffe verwendet werden;
- Waren und Güter eine lange Haltbarkeit und Lebensdauer haben;

Heiß begehrt: Sand und Kies aus dem Meer

Während der Tiefseebergbau noch eine Zukunftsvision ist, fördern viele Staaten seit Jahrzehnten Sand und Kies aus dem Meer. Beide Lockergesteine zählen mittlerweile zu den begehrtesten Rohstoffen der Welt. Sie werden nicht nur für die Herstellung von Beton, Glas und Elektrogeräten wie Computern benötigt, sondern außerdem als Füllsand auf Baustellen und in Häfen, im Küstenschutz für Strandvorspülungen sowie für die Landgewinnung. Der Küstenstadtstaat Singapur beispielsweise hat durch Aufspülungen mit Sand seine Fläche im Zeitraum von 1960 bis 2017 um mehr als 130 Quadratkilometer erweitert – und weitere 56 Quadratkilometer sind bis zum Jahr 2030 geplant. Für diesen Zweck hat das Land in den zurückliegenden 20 Jahren rund 517 Millionen Tonnen Sand und Kies importiert und ist damit zum weltweit größten Sandimporteur aufgestiegen.

„Sand" ist ein Sammelbegriff für mineralische Rohstoffe mit einem Durchmesser von 0,063 bis zwei Millimetern – ganz egal, aus welchem Mineral die einzelnen Sandkörner bestehen. Kies ist gröber. Seine Korngrößen reichen von zwei bis 63 Millimetern. Der meiste Sand entsteht durch die natürliche Verwitterung von Felsgestein. Einen wichtigen Beitrag leisten aber auch Gletscher, deren Eismassen wie Hobel über Gebirgshänge rutschen, oder aber Bäche und Flüsse, die sich nahezu unbemerkt in die Landschaft fressen und große Mengen Sand davonspülen. Meist vergehen Zehntausende Jahre bis ein Felsbrocken als Sand zerkleinert am Ufer eines Flusses oder im Meer abgelagert wird. Sand entsteht allerdings auch direkt im Meer: Papageifische beispielsweise fressen Korallen und scheiden anschließend die unverdaulichen Überreste der Korallenskelette als Sand wieder aus. Ein ausgewachsenes Tier produziert so bis zu 90 Kilogramm Korallensand pro Jahr. Hinzu kommen unendlich viele Schnecken- und Muschelschalen, die von Strömung, Wellen und Wind zerrieben werden.

Die so entstehenden Sandmengen aber reichen schon lange nicht mehr aus, den Sandbedarf der Menschheit zu decken. Experten des Umweltprogramms der Vereinten Nationen schätzten im Jahr 2014, dass weltweit pro Jahr zwischen 32 und 50 Milliarden Tonnen Sand und Kies verarbeitet werden. Sollte sich dieser Verbrauch fortsetzen, was angesichts der wachsenden Weltbevölkerung und der zunehmenden Verstädterung wahrscheinlich ist, wären die natürlichen Ressourcen an Land, in Flüssen sowie im Meer in weniger als 30 Jahren erschöpft. Die Preise für beide Rohstoffe steigen bereits deutlich, in Deutschland mittlerweile um fünf bis zehn Prozent – pro Jahr.

Wie viel Sand und Kies aus den Weltmeeren entnommen werden, lässt sich nur schwer schätzen, weil die Daten immer noch nicht zentral erfasst und Sandvorkommen in vielen Flussläufen und Küstenbereichen illegal abgebaut werden. Fachleute sprechen vielerorts von einer regelrechten Sand-Mafia. Deren Geschäft wächst, weil die Nachfrage nach dem Material enorm steigt – vor allem in wirtschaftlich aufstrebenden Regionen wie China, Indien und Afrika, in denen viel gebaut wird. Eine Beispielrechnung: Für die Herstellung von Beton braucht man Zement als Bindemittel. Zu einer Tonne Zement müssen sechs bis sieben Tonnen Sand und Kies hinzugegeben werden, um zusammen mit Wasser und Zuschlagstoffen Beton herzustellen. Beton wiederum wird aufgrund des globalen Baubooms in solchen Mengen hergestellt, dass diese ausreichen würden, einmal pro Jahr eine 27 Meter hohe und ebenso breite Mauer um den gesamten Äquator zu ziehen. Rechnet man hier den Sand- und Kiesanteil heraus, wird klar, dass der Verbrauch beider Rohstoffe gigantisch ist.

Bei großen Bauprojekten müssen selbst Wüstenstaaten wie die Vereinigten Arabischen Emirate Sand importieren oder aus dem Meer fördern, denn ihr lokaler Dünen- oder Wüstensand eignet sich nicht für die Betonherstellung. Das liegt daran, dass die Sandkörner aus der Wüste zu rund geschliffen sind. Ihre Oberfläche ist zu glatt, ihre Größe zu einheitlich, als dass Zement und andere Zusatzstoffe daran haften bleiben würden. Sand aus Flüssen oder dem Meer dagegen besitzt eine kantigere Form und eine rauere Oberfläche. Er eignet sich hervorragend als Bausand.

In Großbritannien kommt heutzutage etwa jede fünfte Tonne Sand oder Kies, die in England und Wales zu Beton verarbeitet wird, aus den Küstengewässern des Inselstaates. Dennoch belegte das Land im Jahr 2018 nur Platz zwei auf der Liste der größten europäischen Meeressandproduzenten. An der Spitze standen nach Angaben des für den Nordatlantik zuständigen Internationalen Rats für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea, ICES) die Niederlande mit einer Fördermenge von rund 24,6 Millionen Kubikmetern. Dies entspricht, je nach Korngröße, einem Gesamtgewicht von 30 bis 40 Millionen Tonnen. Etwa die Hälfte wurde für Vorspülungen an der Nordseeküste und auf den niederländischen Inseln verwendet. Damit werden in jedem Jahr Sandmassen ausgeglichen, die durch die Herbst- und Winterstürme an der Nordsee fortgespült worden sind. Insgesamt wurden in Europa im Jahr 2018 rund 54,13 Millionen Kubikmeter Sand und Kies aus dem Meer entnommen.

Meeressand und -kies kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn es an Land keine geeigneten Vorkommen gibt. Allerdings ist der Abbau von Sand und Kies im Meer in der Regel teurer als der an Land, weshalb weltweit betrachtet meist Lagerstätten an Land oder in Flussläufen bevorzugt werden. Die Auswirkungen auf die jeweilige Umwelt sind enorm. Flussbetten vertiefen sich, wodurch die Fließgeschwindigkeit zunimmt; Uferbereiche werden weggeschwemmt, Brückenpfeiler unterspült. Werden Sandbänke vor der Küste abgebaut, verlieren die dahinter liegenden Gebiete ihre wirksamsten Wellenbrecher. Folglich nehmen Überschwemmungen, Küstenerosion und Sturmschäden zu. Indonesien hat im Zuge des unkontrollierten Sandabbaus im Meer bereits 24 Inseln verloren.

Von biologischen Studien weiß man, dass die Sandförderung auch das Leben am Meeresgrund beeinträchtigt. Allein im Nordatlantik sind mehr als 48 Fischarten auf sandigen Boden als Laichplatz angewiesen, darunter auch beliebte Speisefische wie der Hering. Die Auswirkungen sind allerdings relativ kleinräumig. Schwer wiegt der Eingriff, wenn die abgebaute Sand- oder Kiesfläche die einzige weit und breit ist und abhängigen Arten der Lebensraum verloren geht. Förderlizenzen sollten deshalb erst nach eingehender Prüfung erteilt werden. Flächen, die intensiv für den Sandabbau genutzt wurden, brauchen im Durchschnitt fünf bis zehn Jahre, um vollständig wieder besiedelt zu werden. Abhängig von den lokalen Umweltbedingungen (Seegang und Sedimentbewegung) und den Wassertiefen, in denen abgebaut wurde, kann eine solche Erholungsphase aber auch Jahrzehnte dauern.

Wird in einem Areal nur kurzfristig oder gar einmalig gebaggert, stellen sich die ursprünglichen Verhältnisse im Idealfall nach zwei bis vier Jahren wieder ein. Dabei erholen sich jene Lebensgemeinschaften am schnellsten, die eine hohe Strömung oder starke Gezeiten gewohnt sind. Arten aus ruhigeren Gewässern brauchen in der Regel etwas länger. Sind durch den Sandabbau besonders tiefe Löcher im Meeresboden entstanden, in denen sich anschließend feines Material ablagert, kann es sogar sein, dass sich dort ganz neue Lebensgemeinschaften bilden.

Aus diesen Gründen empfiehlt die Wissenschaft klare Richtlinien für den Abbau von Sand und Kies im Meer. Dazu gehören ein Förderstopp in Regionen und zu Zeiten, in denen wichtige Fischarten laichen; ein regelmäßiger Wechsel der Förderflächen, sodass sich die Bodengemeinschaften immer wieder erholen können, sowie der Erhalt sogenannter Refugienflächen. Diese liegen zwischen den einzelnen Förderarealen und können betroffenen Bodenbewohnern als Rückzugsraum dienen.

Außerdem muss beim Sandabbau im Meer ein Kompromiss gefunden werden zwischen geringem Flächenverbrauch und der Dauer der Erholungsphase. Baut man den Sand an einer Stelle ab und erzeugt dabei ein tiefes Loch, verbraucht dieses zwar wenig Fläche; es bedarf aber auch einer langen Zeit, bis es sich wieder füllt und wieder besiedelt wird. Geht man mit dem Abbau in die Fläche und hobelt nur die oberste Bodenschicht ab, ist viel Fläche betroffen – die Regenerationszeit aber kurz, zumindest in geringen Wassertiefen. In tieferem Wasser braucht der Meeresboden länger, um sich von dem Eingriff zu erholen, denn hier bewegen und verlagern die Wassermassen weniger Sedimente als im Flachwasserbereich.

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

5.17 > Diese Bilder zeigen zwei der Korallenatolle im Südchinesischen Meer, die China durch Sandaufschüttungen in Inseln verwandelt hat. Sowohl auf dem Fiery-Cross-Riff (oben) als auch auf dem Subiriff ist seit dem Jahr 2017 Militär stationiert. Die Atolle als Lebensraum für Korallen und Riffbewohner sind weitestgehend zerstört worden.

- alle entsorgten Geräte und die darin verbauten Materialien recycelt und wiederverwendet werden.

Kreislaufsysteme schonen nicht nur die Umwelt, sie bringen auch wirtschaftliche Vorteile. Durch das Recycling metallischer Abfälle und Schrotte etwa reduzieren sich die durch den Bergbau geförderten Rohstoffmengen, und in der Produktion wird sehr viel Energie eingespart. Auch wachsen die Abfallberge nicht weiter an. Recht viele Metalle lassen sich außerdem weitestgehend ohne Qualitätsverlust wiederverwerten.

Weltweit werden Rohstoffe wie Eisen, Zink, Kupfer, Gold und Silber heute schon zu 50 bis 90 Prozent wiederverwertet. Bei vielen anderen Metallen besteht noch großes Ausbaupotenzial. Fakt ist aber auch, dass elektronische Produkte und anfallende Schrotte immer komplexer werden, was das Recycling einzelner Materialien erschwert und es teilweise unwirtschaftlich macht. Eine Kreislaufwirtschaft kann zudem nur dann funktionieren, wenn die Menge der wiederaufbereiteten Rohstoffe ausreicht, um die weltweite Nachfrage zu decken.

Fachleute gehen jedoch davon aus, dass angesichts des rapiden Bevölkerungswachstums und des zunehmenden Technologiewandels in allen Teilen der Welt Metallrohstoffe auch künftig aus natürlichen Lagerstätten abgebaut werden müssen. Verbessern ließe sich die Versorgungslage aber, indem Rohstofflagerstätten umfassender erschlossen werden.

Vor diesem Hintergrund beauftragte die Europäische Kommission vor wenigen Jahren Wissenschaftler, herauszufinden, welche Mengen wertvoller Mineralien und Metalle sich in den Abraumhalden ehemaliger Bergwerke oder Tagebaue noch befinden und wie sich diese gewinnen ließen. Das Ergebnis: Die Chancen, Rohstoffe wie Chrom, Niob oder auch Vanadium in den Halden zu finden, sind groß, gerade weil in den Bergwerken an Land früher immer nur ein oder zwei Rohstoffe abgebaut wurden. Einkalkuliert werden müsste allerdings, dass einiger Aufwand zu betreiben wäre, die bislang unberücksichtigten Metalle und Mineralien bergen zu können. Am sinnvollsten wären Methoden, mit denen sich verschiedene Rohstoffe gleichzeitig extrahieren ließen, selbst wenn diese Ansätze in der Regel sehr energieintensiv sind.

Andere Forschende suchen nach Wegen, mit denen sich im Meerwasser gelöste Metalle direkt gewinnen lassen – so zum Beispiel Lithium, welches die Ozeane in einem Umfang von schätzungsweise 180 Milliarden Tonnen speichern. Die tatsächliche Konzentration des Stoffs im Meerwasser aber beträgt lediglich 0,2 parts per million. Um diesen winzigen Anteil zu extrahieren, setzen Wissenschaftler speziell beschichtete Elektroden ein, welche sie wiederholt unter Strom setzen. Als Reaktion auf die elektrische Spannung wandern die Lithiumionen aus dem Wasser in die Elektrode. Diese Methode funktioniert im Versuchsaufbau. Bis zu einer industriellen Anwendung aber ist es noch ein weiter Weg.

Einige deutsche Geologen stellten deshalb im Jahr 2017 die Frage, ob es nicht denkbar wäre, vor einer Aufnahme des technisch aufwendigen und folgenschweren Tiefseebergbaus zunächst im Untergrund der flachen, küstennahen Schelfmeere nach Erzvorkommen zu suchen. Deren Meeresgrund, der sogenannte Kontinentalschelf oder Festlandsockel, stellt eine Verlängerung des Kontinents dar, was vermuten lässt, dass Metall- oder Mineralvorkommen, die an Land in unmittelbarer Küstennähe vorkommen, auch im Meeresgrund zu finden sind. Und wahrscheinlich ließen sich diese küstennahen Ressourcen vergleichsweise einfach und mit deutlich geringeren Risiken abbauen als die Erzvorkommen in der Tiefsee. Die Geologen prognostizieren zum Beispiel große Goldvorkommen vor der Westküste Afrikas, Nickellagerstätten im Arktischen Ozean und Blei-Zink-Vorkommen im Golf von Mexiko und dem Mittelmeer. Neu wäre eine Rohstoffförderung in vielen dieser Regionen nicht. Seit mehr als 70 Jahren werden in einigen Schelfmeeren Erdöl und Erdgas gefördert; andernorts werden im Küstenbereich Sand und Kies abgebaut – allerdings auch nicht folgenlos für die empfindlichen Ökosysteme der Küstengewässer.

Das heißt: Solange der Rohstoffbedarf steigt und wirklich nachhaltige Alternativen fehlen, bleibt die Gewinnung mineralischer Rohstoffe stets eine Interessenabwägung, bei der sich die Frage stellt, wie der Nutzen im Verhältnis steht zu den teilweise nicht absehbaren Folgen für Umwelt und Mensch. Die Staatengemeinschaft steht zudem auch erstmals vor der Entscheidung, ob ein industrieller Bergbau tatsächlich auch in der internationalen Tiefsee stattfinden soll.

Trinkwasserreserven im Meeresboden

War Süßwasser früher nur in trockenen Regionen ein kostbares Gut, versiegen mittlerweile auch in vielen Küstengebieten der Erde die Seen, Flüsse, Quellen und Brunnen. Die Gründe dafür sind vielschichtig: Mancherorts regnet es im Zuge des Klimawandels weniger. Anderswo fällt der Niederschlag nicht mehr gleichmäßig über die Zeit verteilt, sondern episodenhaft als sogenannter Starkregen. Bei solchen extremen Niederschlagsereignissen läuft das meiste Wasser oberflächlich ab, weil das Erdreich es nicht schnell genug absorbieren kann. Gleichzeitig steigt der Süßwasserverbrauch, weil mehr und mehr Menschen in die Küstenregionen ziehen oder dort Urlaub machen und die Bauern mehr Flächen bewässern. Mancherorts werden Oberflächengewässer und Grundwasserreservoirs aber auch grundlos verschmutzt, etwa durch Überdüngung oder den Einsatz von Pestiziden.

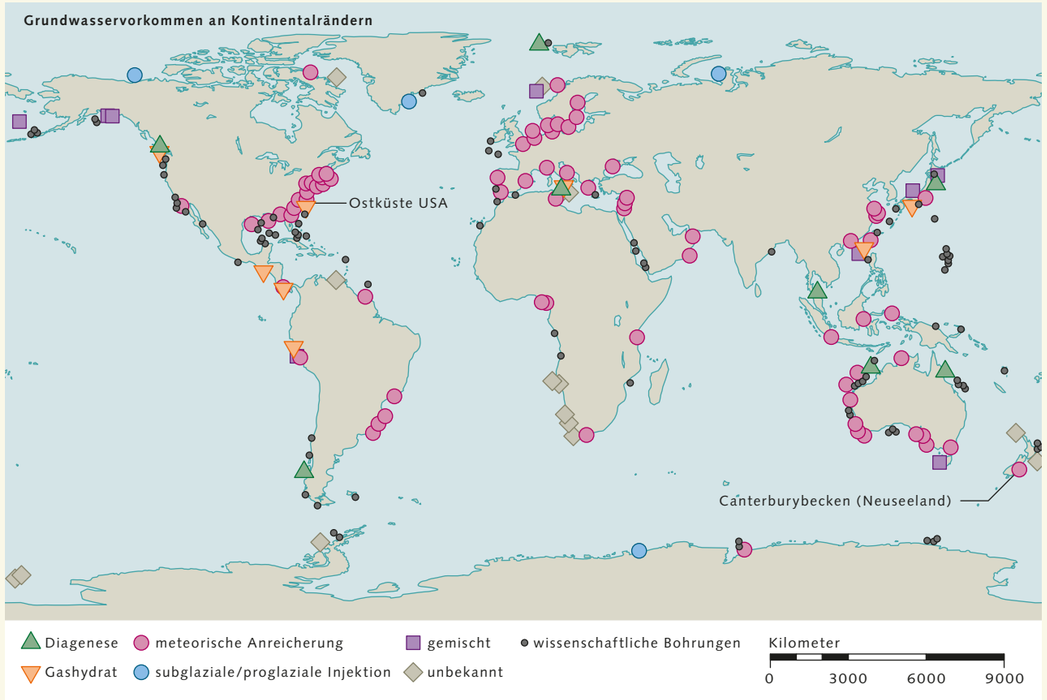
Aufgrund der zunehmenden Wasserknappheit suchen Forschende seit geraumer Zeit nach neuen Süßwasserreservoirs. Ihre Suche konzentriert sich dabei vor allem auf das Meer, denn seit einigen Jahren weiß man, dass es vermutlich auf allen Kontinenten in Küstennähe auch unterhalb des Meeresbodens unerschlossene Grundwasservorkommen gibt. Die meisten Offshore-Reservoirs wurden bisher an der Ostküste der USA, an der Nordwestküste Europas sowie an der Westküste Australiens entdeckt. Schätzungen zufolge speichern alle bekannten Reservoirs unter dem Meer zusammen etwa eine Million Kubikkilometer Süßwasser. Diese Menge würde theoretisch ausreichen, das Schwarze Meer zweimal zu füllen oder die Bevölkerung Deutschlands mehr als 192 000 Jahre lang mit Trinkwasser zu versorgen.

Grundwasservorkommen unter dem Meer können auf unterschiedliche Weise entstehen. Fachleute kennen mittlerweile fünf Entstehungsprozesse: Manche Reservoirs entstehen durch den natürlichen Zerfall gefrorener Gashydrate im Meeresboden; dabei wird salzarmes Wasser freigesetzt. Anderenorts sammelt sich Wasser im Untergrund, welches durch physikalische und chemische Prozesse im Zuge der Verfestigung von Sedimenten entsteht. Fachleute nennen diese Gesteinsbildung auch Diagenese. Vorkommen in ehemals von Gletschern bedeckten Küstenregionen können darauf zurückgeführt werden, dass hier einst große Eismassen vorkamen, deren Schmelzwasser in den Meeresboden gelangte und sich dort ansammelte (subglaziale/proglaziale Injektion). Einige bekannte Offshore-Reservoirs werden auch von Land aus gespeist – etwa indem Niederschläge an Land versickern und von tief liegenden Gesteinsschichten unterirdisch Richtung Meer abgeführt werden (meteorische Anreicherung 1).

Die meisten Grundwasserspeicher im Meer sind jedoch während zurückliegender Kaltzeiten wie etwa der Eiszeit vor rund 20 000 Jahren entstanden. Damals wuchsen die Eisschilde in der Arktis und Antarktis, gleichzeitig sank der globale Meeresspiegel im Vergleich zu heute um mehr als 100 Meter. Infolgedessen fielen auf der gesamten Erde flache Küstengewässer, die sogenannten Schelfgebiete oder Kontinentalränder, trocken. Regnete oder schneite es dann auf diese Flächen, versickerte das Wasser im Erdreich und sammelte sich in harten, von Poren durchzogenen Kalkgesteinen, die das Wasser wie ein Schwamm speichern (meteorische Anreicherung 2). Als der Meeresspiegel zum Ende der Eiszeit wieder stieg, wurden die Schelfgebiete abermals überschwemmt. Die Grundwasserreservoirs in der Tiefe befinden sich seitdem jenseits der Küste und wecken vor allem das Interesse wasserarmer Staaten wie Südafrika, Mexiko, Neuseeland oder auch Malta.

In den Gewässern Maltas liegen die wasserführenden Kalkgesteine etwa 400 Meter tief im Meeresboden, wie wissenschaftliche Untersuchungen unter deutscher Leitung ergaben. Vor der neuseeländischen Küste von Canterbury (östlicher Teil der Südinsel) dagegen brauchten die Forschenden nur 20 Meter tief in den Meeresboden bohren, um auf süßwasserführendes Gestein zu stoßen. Das Grundwasserreservoir dort ist eines der flachsten der Welt. Es erstreckt sich bis zu 60 Kilometer von der Küstenlinie entfernt und umfasst bis zu 200 Kubikkilometer Wasser. Zum Vergleich: Deutschlands größter Binnensee, der Bodensee, speichert 48 Kubikkilometer Wasser. Das Grundwasservorkommen vor der neuseeländischen Küste ist somit etwa viermal so groß.

Solche detaillierten Erkenntnisse über die Süßwassersysteme unter dem Meer gewinnen Forschende, indem sie neuerdings verschiedene geophysikalische und geochemische Forschungsmethoden zusammenführen. Mithilfe der sogenannten marinen Elektromagnetik messen sie den elektrischen Widerstand des Untergrundes. Von ihm lässt sich ableiten, ob das Gestein im Untergrund Salz- oder Süßwasser in seinen Poren speichert. Salzwasser leitet hervorragend, bei Süßwasser dagegen verdreifacht sich der elektrische Widerstand. Um den Salzgehalt des Porenwassers genau zu bestimmen und das Volumen des Grundwasserkörpers abzuschätzen, kombinieren die Geologen anschließend ihre elektromagnetischen Daten mit den seismisch erfassten Schichtprofilen des Meeresbodens. Diese Zusammenführung ist in erster Linie ein statistisch-mathematisches Verfahren, bei dem numerische Modelle und Algorithmen zum maschinellen Lernen (englisch: Machine Learning Algorithms) zum Einsatz kommen. Die Methode versetzt die Fachleute in die Lage, Offshore-Süßwassersysteme außergewöhnlich detailliert zu beschreiben und zu kartieren. Genau genommen ist diese Forschung also fast ein bisschen mehr Mathematik als Geologie und Hydrologie.



5.18 > Mittlerweile hat man Grundwasservorkommen in Küstengebieten aller Kontinente gefunden. Sie entstehen durch den Zerfall gefrorener Gashydrate, durch die Verfestigung von Sedimenten (Diagenese), durch Gletscher-Schmelzwassereinträge, durch Regenwassereinspeisung von Land sowie in den meisten Fällen durch die Bildung von Grundwasserspeichern während vergangener Kaltzeiten.

Energiequelle Meer: Potenzial und Erwartungen

> Die Energiewende wird auf dem Meer vorangetrieben. Zu den Hauptakteuren gehören dabei unter anderem die großen Erdölkonzerne. Sie investieren in den Ausbau der Offshore-Windenergie und entwickeln Konzepte zur Einlagerung von Kohlendioxid im Meeresboden. Beide Technologien wecken die Hoffnung, dass die Abkehr von Kohle, Erdöl und -gas doch noch gelingen kann. Für den Ozean aber bedeutet die Entwicklung, dass viele seiner Gebiete künftig noch intensiver vom Menschen genutzt werden – und zwar dauerhaft.

Zeitenwende im Energiesektor

Energie macht unser Leben ein enormes Stück einfacher. In Form von Elektrizität bewegt sie Maschinen, Züge und immer mehr Autos. Sie erlaubt Kommunikation in Bild und Echtzeit rund um den Globus und erhellt Wohnungen oder ganze Städte, selbst wenn die Sonne längst hinter dem Horizont versunken ist. In Form von Wärme schmilzt Energie Eis und Eisenerze und sorgt bei Kälte für wohlig warme Wohnungen. Freigesetzt bei der Treibstoffverbrennung in Motoren lässt sie den Verkehr rollen und Flugzeuge fliegen.

Weil die Weltbevölkerung wächst, immer mehr Menschen eine Heizung, einen Stromanschluss und ein Fahrzeug besitzen und immer größere Bereiche des menschlichen Alltages elektrifiziert werden, steigt auch der globale Primärenergieverbrauch. Darunter verstehen Experten die insgesamt für die Versorgung der Weltwirtschaft benötigte Energiemenge. Bislang wird diese vor allem durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt. In Deutschland beispielsweise stammten im Jahr 2018 noch rund 80 Prozent der verbrauchten Energie aus Kohle, Erdgas und Erdölprodukten. Betrachtet man einzig und allein die globale Stromproduktion, werden noch immer zwei Drittel der weltweit benötigten Elektrizität durch die Verbrennung fossiler Energieträger gewonnen. Die Treibhausgasemissionen des Energie- und Verkehrssektors sind entsprechend hoch – und mehr als ein Viertel des verfeuerten Öls und Gases wurde im Meer gefördert.

Dem Energiesektor steht jedoch in zweifacher Hinsicht ein radikaler Umbau bevor. Die Netze müssen ausgebaut, modernisiert und intelligent gesteuert werden, um den wachsenden Ansprüchen gerecht zu werden. Gleichzeitig sollen erneuerbare Energiequellen wie Wind, Sonne, Biomasse und die Kraft des Wassers die angestammten fossilen Energieträger ablösen. Der Ozean nimmt auch dabei eine Schlüsselrolle ein: zum einen als Standort für gigantische Windfarmen, zum anderen als Antrieb für Wellen- und Strömungskraftwerke. Außerdem wird diskutiert, ob ausgeförderte Erdgaslagerstätten im Meeresboden nicht der geeignetste Ort wären, um in Industrieprozessen abgeschiedenes und anschließend verflüssigtes Kohlendioxid einzulagern. Das Speicherpotenzial jedenfalls wäre enorm und interessiert gegenwärtig vor allem eine Gruppe von Unternehmen: erdöl- und erdgasfördernde Konzerne.

Tief- und Tiefstwasser
Der Begriff „Tiefwasser“ stammt aus einer Zeit, in der Bohrplattformen noch am Meeresboden gegründet wurden. Er bezeichnet eine Wassertiefe, ab welcher diese Gründung nicht mehr möglich war. Die dazugehörige Zahlenangabe aber verschob sich mit fortschreitender technologischer Entwicklung. Wurde in den 1990er-Jahren bereits bei einer Wassertiefe von 300 Metern von „Tiefwasser“ gesprochen, wird der Begriff heutzutage bei Wassertiefen von mehr als 500 Metern angewendet. Sprechen Rohstoffexperten dagegen von „Tiefstwasser“, meinen sie eine Wassertiefe von mehr als 1500 Metern.

Erdöl- und Erdgasförderung im Meer

Viele Erdöl- und Erdgaslagerstätten der Welt liegen im Meer. Entstanden über Jahrmillionen, wurden die ersten von ihnen Ende des 19. Jahrhunderts im Santa Barbara Channel vor der Küste des US-Bundesstaates Kalifornien abgeteuft – damals allerdings noch in Sichtweite zur Küste. Flachwasser und die Nähe zum Land aber sind seit mehr als 70 Jahren keine Grundvoraussetzung mehr. Aufgrund verbesserter Erkundungsverfahren, Bohr- und Fördermethoden können Erdöl und Erdgas mittlerweile selbst in Lagerstätten gefördert werden, die in Wassertiefen von mehr als 3000 Metern liegen ober aber weiter als 160 Kilometer vor der Küste. Die möglichen Bereiche der sogenannten Tief- oder Tiefstwasserförderung sind allerdings auf die Schelfmeere und somit auf die Kontinentalränder beschränkt. Die Tiefseeebenen der Ozeane, die den weitaus größten Anteil der Meeresfläche ausmachen, sind von ozeanischer Kruste unterlagert und haben ein sehr geringes oder kein Erdöl- und Erdgaspotenzial.

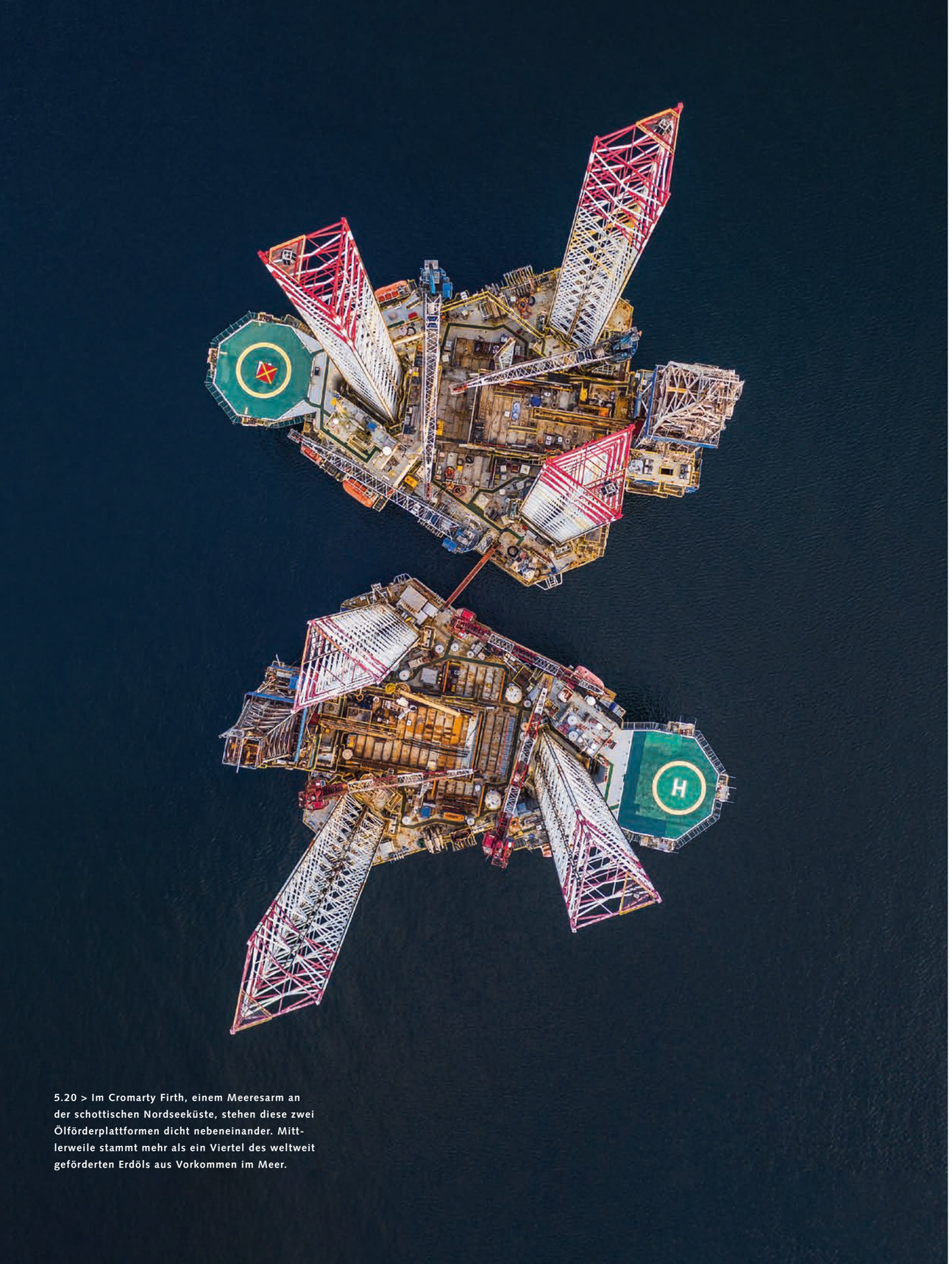
Extrem sind mittlerweile auch die Bohrtiefen im Meer. Die tiefsten Ölbohrungen im Golf von Mexiko beispielsweise reichen mehr als 6000 Meter weit in den Meeresboden, wobei es Bohrplattformen gibt, deren Bohrer theoretisch bis zu 11 400 Meter weit in den Untergrund vorstoßen könnten, sofern die Bedingungen dies zulassen.

5.19 > Ein Versorgungsschiff des norwegischen Energiekonzerns Equinor bringt Technik für die Erdölförderung im Johan-Castberg-Ölfeld in die Arktis. Sowie das Vorkommen in der Barentssee erschlossen ist, wird es das nördlichste Ölförderfeld Norwegens sein.

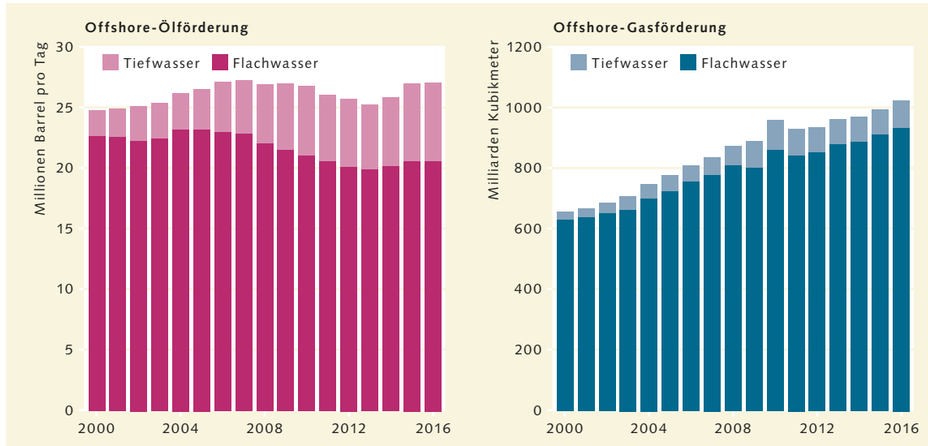
Die technische Entwicklung erlaubt den Erdölunternehmen außerdem, ihre Produktion in Gebiete auszuweiten, deren teilweise extreme Wetter- oder Umweltbedingungen eine Förderung bislang verhindert haben. So errichten die beiden norwegischen Energieunternehmen Vår Energi AS und Equinor (ehemals Statoil) im Jahr 2016 die Bohr- und Förderplattform Goliat in der arktischen Barentssee und erschlossen damit das bislang nördlichste Ölfeld der Welt. Die Erschließung eines zweiten, noch weiter nördlich gelegenen Vorkommens läuft bereits. Auf dem Johan-Castberg-Ölfeld soll im Jahr 2023 die Förderung beginnen.

Erdöl und Erdgas im Meer zu fördern, ist zeit- und vor allem kostenintensiv. Von der Entdeckung einer Offshore-Erdöllagerstätte im Tiefstwasser bis zum Verkauf des ersten Öls können bis zu zehn Jahre vergehen. Die Ausgaben für die geologischen Voruntersuchungen sowie alle notwendige Bohr- und Produktionstechnik summieren sich meist auf Milliardenbeträge. Die Entscheidung für oder gegen die Erschließung eines Offshore-Feldes fällen Unternehmen daher nicht auf Basis des aktuellen Ölpreises, sondern mit Blick auf die zukünftige Preisentwicklung. Aus diesem Grund sind die Offshore-Produktionsmengen auch nicht so eng an die aktuelle Preisentwicklung gebunden wie die Ölfördermengen aus Lagerstätten an Land.

Die im Meer geförderten Öl- und Gasmengen machen nach Angaben der Internationalen Energieagentur IEA (International Energy Agency, auch Weltenergieagentur genannt) mehr als ein Viertel der globalen Gesamtproduktion aus. Weltweit sind mittlerweile rund 6500 Offshore-Erdöl- und Erdgasförderanlagen in Betrieb. Gefördert wird vor allem in Gewässern im Nahen Osten und Brasilien sowie in der Nordsee, im Golf von Mexiko, im Nigerdelta sowie im Kaspischen Meer. Während die Offshore-Ölfördermenge im Zeitraum von 2000 bis 2018 relativ stabil bei 26 bis 27 Millionen Barrel pro Tag gelegen hat, ist die Gasfördermenge in derselben Zeitspanne um 50 Prozent angestiegen – auf mehr als 1000 Milliarden Kubikmeter. Eine neue Entwicklung ist zudem, dass Verarbeitungsschritte wie zum Beispiel die Verflüssigung von Erdgas nicht mehr nur an Land stattfinden, sondern zunehmend auch auf Spezialschiffen auf dem Meer.



5.20 > Im Cromarty Firth, einem Meeresarm an der schottischen Nordseeküste, stehen diese zwei Ölförderplattformen dicht nebeneinander. Mittlerweile stammt mehr als ein Viertel des weltweit geförderten Erdöls aus Vorkommen im Meer.



5.21 > Seit dem Jahr 2000 steigt die Menge der im Meer geförderten fossilen Rohstoffe, eine Entwicklung, die vor allem auf eine verstärkte Erdgasförderung zurückzuführen ist. Diese findet überwiegend im Flachwasser statt. Erdöl dagegen wird in zunehmendem Maß im Tiefwasser gefördert.

Vor diesem Hintergrund wird in den Meeren auch kontinuierlich nach neuen Erdöl- oder Erdgaslagerstätten gesucht. In den zurückliegenden zwei Jahrzehnten wurden die größten Vorkommen allesamt in Gebieten lokalisiert, deren Wassertiefe mehr als 400 Meter beträgt. Zusammen machen sie in etwa die Hälfte aller Öl- und Gasvorkommen aus, die im Zeitraum von 2008 bis 2018 weltweit neu entdeckt wurden. Schaut man sich jede der neuen Lagerstätten im Meer einzeln an, wird deutlich, dass nur einige ölführend sind. Mehr als die Hälfte der neu entdeckten Vorkommen wurde als Erdgasfeld eingestuft.

Trotz der vielen Neuentdeckungen wurden viele Pläne für Offshore-Neuerschließungen nach dem Deepwater-Horizon-Unglück im Jahr 2010 und dem Ölpreisverfall im Jahr 2014 erst einmal auf Eis gelegt. Gleichzeitig sank die Zahl der aktiven Förderplattformen von 320 im Jahr 2013 auf rund 220 im Jahr 2016. Ein Grund für diesen Rückgang war die enorme Ausweitung des hydraulischen Frackings an Land, vor allem in den USA. Beim Fracking werden Flüssigkeiten mit hohem Druck in tief liegende dichte Tongesteinsschichten gepresst, sodass Risse in diesen sogenannten Schiefer- oder Erdölmuttergesteinen entstehen. Anschließend können eingelagerte Vorkommen von Schiefergas und Schieferöl abgebaut werden – und das deutlich günstiger als bei den teuren Offshore-Bohrungen.

Die wachsende Konkurrenz durch das Fracking und der damit verbundene Preiskampf zwangen die Offshore-Industrie zu Anpassungen. Umgesetzt werden nur noch vielversprechende Bohrvorhaben, und diese sind in der Regel deutlich effizienter geplant. Das Design der Plattformen wurde vereinfacht, größtenteils standardisiert und in manchen Fällen sogar verkleinert. Gleichzeitig trägt das weltweite Überangebot an Offshore-Technik und -Dienstleistungen dazu bei, dass die Betriebskosten sinken. Warfen Ölförderanlagen in norwegischen Gewässern oder im Golf von Mexiko früher erst Gewinne ab, wenn der Marktpreis für Öl über eine Grenze von 60 bis 80 US-Dollar pro Barrel (Fass mit 159 Liter Fassungsvermögen) stieg, so sind moderne Anlagen heutzutage bereits ab einem Barrelpreis von 25 bis 40 US-Dollar rentabel.

Derzeit versuchen die Unternehmen, weitere Kosten zu sparen, beispielsweise indem sie ausgewählte Prozesse der Offshore-Förderung digitalisieren. Denn klar ist auch: Die Lagerstätte für das jeweils nächste Projekt liegt vermutlich in noch tieferem Wasser oder noch weiter von der Küste entfernt. Sie wird die Betreiber daher vor jede Menge neue Herausforderungen stellen, seien diese technischer, logistischer oder aber finanzieller Natur – wobei Überraschungsfunde in bislang nur wenig erkundeten Küstengewässern nicht ausgeschlossen sind. US-amerikanische Fachleute listeten im Jahr 2018 unter anderem folgende Punkte als wissenschaftlich-technische Hürden der Branche auf:

Methanhydrate: Am Ende entscheidet der Preis

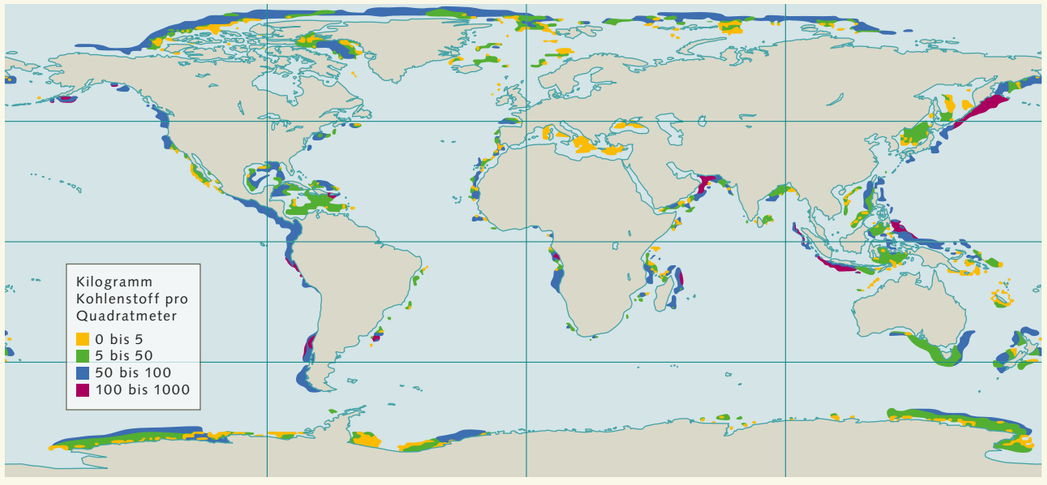
Erdgas kommt im Meeresboden nicht nur als gasförmige Variante vor, sondern vermutlich viel häufiger als sogenanntes Gashydrat – das heißt in fester Form. Gashydrate bestehen in erster Linie aus gefrorenen Wassermolekülen, die ein festes Kristallgitter bilden. Auf den ersten Blick sehen sie deshalb auch wie Eis aus. Anders als beim Eis aber sind im Kristallgitter eines Gashydrates ein oder mehrere Gase eingeschlossen. In vielen Fällen handelt es sich dabei um Methan. Möglich sind aber auch Stickstoff, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Ethan oder aber Propan.

Gashydrate stellen somit eine hochkonzentrierte Form natürlicher Gase dar. Aus einem Kubikmeter Methanhydrat beispielsweise können 160 bis 180 Kubikmeter Methangas gewonnen werden, weshalb Methanhydrate jahrzehntelang als attraktiver Rohstoff zur Energiegewinnung betrachtet wurden. Wissenschaftlichen Studien zufolge lagern weltweit zwischen 100 und 1000 Billionen Kubikmeter Methangas in Form von Hydraten im Meeresboden der Schelfmeere und Kontinentalränder. Diese Menge würde theoretisch ausreichen, den aktuellen Gasverbrauch der Welt (2019: 4,088 Billionen Kubikmeter) für mindestens weitere 24 Jahre zu decken.

Realistisch betrachtet aber ließe sich vermutlich nur ein vergleichsweiser kleiner Teil dieser Vorkommen tatsächlich abbauen, denn Gashydrate bilden sich nur an den Kontinentalrändern ab einer Wassertiefe von circa 300 Metern. Die Erklärung dafür ist zweigeteilt: Zum einen rieselt nur an den Kontinentalrändern so viel organisches Material aus den oberen Wasserschichten in die Tiefe, dass die im Meeresboden lebenden Mikroben dieses im großen Umfang zersetzen und dabei Methan erzeugen können. Zum anderen ist erst ab etwa 300 Meter Wassertiefe der Druck hoch genug, dass sich aus im Sediment gebildeten Gasen und Porenwasser Hydrate bilden und stabil bleiben. Verändert sich die Temperatur des Meeresbodens oder sinkt der Druck in der Tiefe, verflüssigt sich das Kristallgitter aus Wassermolekülen – und das eingeschlossene Gas entweicht. Dieser physikalische Prozess wird als Dissoziation bezeichnet und erklärt, warum man Methanhydrate anzünden kann. Das Feuer des Streichholzes schmilzt zuerst das Eis und entzündet anschließend das entweichende Gas.

Methanhydrate abzubauen ist technisch seit geraumer Zeit möglich. Japanische, US-amerikanische und europäische Forscher haben bereits entsprechende Verfahren entwickelt und im Feld getestet. Ihre Forschungsergebnisse waren jedoch ernüchternd. Gemessen an der Förderung normalen Erdgases, verging viel zu viel Zeit, bis die angebohrten Gashydrate in der Tiefe dissoziierten und das entweichende Gas durch Rohrleitungen aufstieg. Angesichts der hohen Investitionskosten sei eine industrielle Förderung deshalb unwirtschaftlich, schlussfolgerten viele Fachleute nach den Tests. Nichtsdestotrotz investieren vor allem Japan und China weiterhin in die Entwicklung neuer Abbaumethoden. Gelänge es, kostengünstigere Verfahren zu entwickeln, könnte beispielsweise Japan die Gashydratvorkommen in seinen Hoheitsgewässern abbauen und damit seine Abhängigkeit von Flüssiggasimporten reduzieren. Noch aber ist den beteiligten Fachleuten der entscheidende Durchbruch nicht gelungen. Angesichts der aktuellen Weltmarktpreise für Erdgas wäre der Abbau von Methanhydraten nach wie vor ein Verlustgeschäft.

5.22 > Holt man Methanhydrate vom Meeresgrund hinauf, zerfallen sie unter Atmosphärendruck. Das frei werdende Methan lässt sich dann leicht entzünden.



5.23 > Methanhydrate kommen weltweit vor allem an den Kontinentalabhängen vor. Die größten Lagerstätten werden vor Peru und vor der Arabischen Halbinsel vermutet. Die Grafik berücksichtigt nur jene Gashydrate, deren Methan durch Mikroorganismen erzeugt wurde. Nicht berücksichtigt sind Methanmengen, die in tieferen Sedimentschichten durch chemische Umwandlung von Biomasse entstanden sind.

Blick durch dicke Salzschichten

In einigen Regionen wie zum Beispiel im Golf von Mexiko und vor der Küste Brasiliens liegen einige Erdölvorkommen in Gesteinsschichten unterhalb dicker Salzschichten. Diese bis zu zwei Kilometer dicken Salzablagerungen aber sind mit herkömmlichen seismischen Methoden kaum zu durchdringen. Gebraucht werden neue Analysetechniken und Hochleistungscomputer, die in der Lage sind, die vielen geologischen Daten auszuwerten. Ein weiteres Problem: Salz löst sich auf, wenn es mit Bohrflüssigkeit in Kontakt kommt. Unter Umständen kann es sogar das Bohrsystem oder den Bohrschacht beschädigen. Wer durch die Salzschichten bohren will, benötigt daher neue, für Salz geeignete Technik.

Hitze- und druckbeständige Bohrtechnik

Herkömmliche Bohrtechnik kann bis zu Temperaturen von rund 175 Grad Celsius eingesetzt werden. Bei künftigen Bohrungen nach besonders tief gelegenen Lagerstätten aber könnten Umgebungstemperaturen von bis zu 260 Grad Celsius entstehen. Im Bohrschacht wäre es also heiß genug, um eine Pizza zu backen. Solche Bedingungen bedeuten allerdings den sicheren Hitzetod für viele Sensoren und Elektroteile, die im Bohrsystem verbaut sind. Benötigt wird deshalb besonders hitzebeständige Bohrtechnik, die außerdem auch noch einen Druck aushält, der 2000-mal größer ist als der Luftdruck an der Erdoberfläche.

Neue Installations- und Beobachtungssysteme

Bei der Erdöl- oder Erdgasförderung im tiefen Wasser verzichten Unternehmen immer öfter auf schwimmende Förderplattformen. Stattdessen installieren sie einen sogenannten Bohrlochkopf am Meeresboden. Von diesem aus fließt das Öl oder Gas dann über Rohrleitungen direkt bis zur Küste. Überwacht werden müssen die untermeerischen Anlagen aber dennoch. Gebraucht wird dazu ferngesteuerte Überwachungstechnik, beispielsweise autonom agierende Unterwasserfahrzeuge, die mithilfe von Sensoren und Kameras das Fördersystem auf Leckagen oder Schwachstellen hin untersuchen.

Sturmfeste Förderanlagen

Wirbelstürme sind vor allem im Golf von Mexiko ein zunehmendes Sicherheitsproblem, insbesondere, weil die

Hurrikane immer kraftvoller werden. Öl- und Gasförderanlagen in sturmanfälligen Gebieten rund um den Erdball müssen diesen Wetterextremen problemlos standhalten können. Der Einsatz verbesserter Technik oder die Installation ferngesteuerter Unterwassersysteme ist daher unabdingbar.

Eine weitere Herausforderung stellt die seit Jahrzehnten im Einsatz befindliche Fördertechnik dar. Nach Angaben der IEA werden bis zum Jahr 2040 weltweit etwa 2500 bis 3000 Erdöl- oder Erdgasförderanlagen ihr Lebensende erreichen. Viele von ihnen sind Stahlplattformen im flachen Wasser. Mit der Zeit aber werden auch deutlich kompliziertere Anlagen aus der Tiefsee dazukommen. Die umweltfreundlichste Art der Entsorgung wäre es, diese Anlagen komplett abzubauen und dann an Land zu verschrotten. Denkbar sind mittlerweile aber auch andere Lösungen, so zum Beispiel jene, geeignete Plattformen als Standort oder Fundament für Offshore-Windräder weiterzuverwenden.

Der Meeresboden als Endlager für Kohlendioxid

Die Idee, ausgediente Öl- oder Erdgasplattformen für die Gewinnung von Strom aus Windkraft einzusetzen, ist jedoch nur der Anfang. Angesichts der fortschreitenden Erderwärmung und des immer größer werdenden Handlungsdrucks diskutieren Regierungen und Unternehmen inzwischen intensiv, ob man Kohlendioxid nicht in ausgebeuteten Erdöl- oder Erdgaslagerstätten unter dem Meer speichern und eine weitere Erderwärmung auf diese Weise verhindern könnte.

Neu sind diese Überlegungen zur sogenannten Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (carbon capture and storage, CCS) keineswegs. Entsprechende Konzepte und Ansätze existieren bereits seit mehreren Jahrzehnten. Bislang aber war es für die Industrie in der Regel immer deutlich billiger, Treibhausgase direkt in die Atmosphäre zu entsorgen, als sie aufwendig abzuscheiden und unterirdisch einzulagern.

Eine von zwei Ausnahmen bildet die Erdölindustrie selbst. Vor allem in den USA leiten erdölfördernde Unternehmen Kohlendioxid in Erdöllagerstätten, um den Druck auf das im Untergrund verbliebene Öl zu erhöhen und es Richtung Förderquelle zu pressen.

Das Kohlendioxid verbessert gleichzeitig die Fließeigenschaften des Öls, sodass es schneller gefördert werden kann. Ein Teil des eingesetzten Kohlendioxids verbleibt bei dieser Art der Ölförderung (englisch: Enhanced Oil Recovery, EOR) im Untergrund und ist somit dauerhaft eingelagert. Bislang stammen allerdings nur 30 Prozent des eingesetzten Kohlendioxids aus industriellen Abscheidungsprojekten, der restliche Teil kommt wie Erdgas aus dem Untergrund.

Norwegen geht noch einen Schritt weiter. Das Land hat bereits im Jahr 1996 eines seiner ehemaligen marinen Erdgasfelder in einen Kohlendioxidspeicher umgewandelt. Im sogenannten Sleipner-Projekt in der Nordsee wird Kohlendioxid, welches direkt vor Ort bei der Erdgasförderung mit zur Meeresoberfläche aufsteigt, aufgefangen, verflüssigt und anschließend 880 bis 1100 Meter tief im Meeresboden eingelagert. Das gleiche Konzept verfolgt der verantwortliche norwegische Erdölkonzern Equinor (ehemals Statoil) seit 2007 auch im Snøhvit-Feld in der südlichen Barentssee. Betrachtet man beide CCS-Projekte zusammen, verpresst der Konzern mittlerweile rund 1,7 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr im Meeresuntergrund. Diese Menge entspricht in etwa den Emissionen eines kleinen Kohlekraftwerkes. Doch das ist erst der Anfang.

Das Unternehmen ist derzeit nach eigenen Angaben an mehr als 40 CCS-Projekten beteiligt und entwickelt Konzepte, mit denen es gelingen soll, Kohlendioxid bei der Industrieproduktion an Land abzutrennen, zu verflüssigen und anschließend mit Schiffen oder aber über Pipelines zu Einleitungsstationen auf dem Meer zu transportieren. Dazu gehört auch Northern Lights, ein norwegisches Großprojekt, in dem Kohlendioxid, welches bei der Zementproduktion und bei der Müllverbrennung im Großraum Oslo entsteht, abgeschieden und per Schiff zum CCS-Terminal in Øygarden an die Westküste Norwegens gebracht werden soll. Von dort soll es dann über eine 110 Kilometer lange Pipeline auf die Nordsee hinausgepumpt werden, zu einer Einleitungsstation südlich des Troll-Erdgasfeldes, welche das verflüssigte Kohlendioxid anschließend in 2500 Meter Tiefe unter dem Meeresgrund verpresst. Alle dazu notwendigen technischen Anlagen sollen im Jahr 2024 ihren Betrieb aufnehmen.

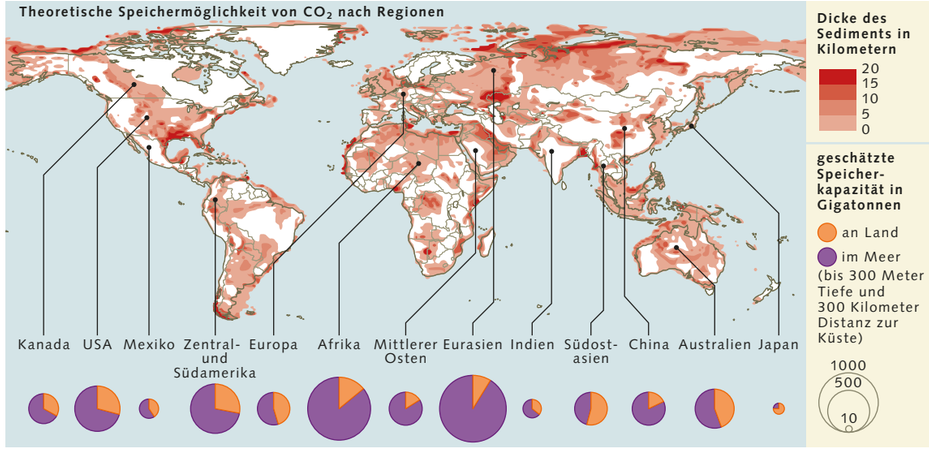
Ähnliche Pläne verfolgt eine Unternehmensgruppe in den Niederlanden. Eine ausgediente Erdgaslagerstätte vor Rotterdam (Porthos-Projekt) soll künftig als Kohlendioxidspeicher dienen und einen Teil jener 28 Millionen Tonnen Kohlendioxid aufnehmen, die jährlich im Hafen der Stadt und in dem dazugehörigen Industriegebiet freigesetzt werden. Laut Projektplan könnten jährlich zwei bis fünf Millionen Tonnen Kohlendioxid in die Porthos-Lagerstätte eingebracht werden. Ob die emissionsverursachenden Unternehmen am Ende ihren bisherigen Absichtserklärungen aber auch Taten folgen lassen und in die immer noch teure Speicherung von Kohlendioxid einsteigen werden, bleibt abzuwarten.

Groben Schätzungen zufolge kostet es mehr als 50 Euro, eine Tonne Kohlendioxid in einem Zementwerk abzuscheiden, sie auf das Meer hinaus zu transportieren und im Untergrund zu verpressen. Wirtschaftlich attraktiv werden CCS-Projekte demzufolge erst, wenn die Kosten für Kohlendioxidemissionen die Kosten der Abscheidung und Speicherung überbieten. Dazu müssten die Steuern auf Emissionen jedoch ebenso drastisch steigen wie die Preise für sogenannte Emissionszertifikate. Nach Angaben der Weltbank zahlten Unternehmen im Jahr 2019 zwischen ein und 19 US-Dollar für jede Tonne von freigesetztem Kohlendioxid, wobei mehr als die Hälfte der Emissionen mit Abgaben von weniger als zehn US-Dollar belegt wurden.

In Europa fokussieren CCS-Initiatoren bislang vor allem auf die Nordsee. Das liegt nicht nur an der Vielzahl großer Industrieunternehmen im Küstenraum, sondern auch an den idealen geologischen Bedingungen im Nordseeboden. Um verflüssigtes Kohlendioxid im Untergrund zu speichern, braucht man zunächst einmal eine dicke Sandsteinformation mit vielen großen Poren zwischen den einzelnen Sandkörnern, damit sich das eingeleitete Kohlendioxid leicht im Porenraum ausbreiten kann. Über dieser Sandsteinformation muss dann allerdings auch eine Schicht aus feinem Tongestein liegen, welche das großporige Sandgestein abdichtet und verhindert, dass das Kohlendioxid in flachere Meeresbodenschichten aufsteigen kann.

Nach der Injektion verteilt sich das verflüssigte Kohlendioxid in den Gesteinsporen und beginnt sich langsam im Porenwasser der Sandsteinformation zu lösen. Dieser Prozess allein dauert einige Hundert Jahre. Anschließend kann das gelöste Kohlendioxid mit dem umliegenden Gestein reagieren. Das heißt, es löst dieses auf und bildet unter Umständen neues Gestein (Kalk und weitere Karbonate), in welchem das Kohlendioxid dann auf Dauer fest

5.24 > Im Sleipner-Gasfeld in der Nordsee wird Kohlendioxid, das bei der Erdgasförderung mit zur Meeresoberfläche aufsteigt, direkt vor Ort aufgefangen, verflüssigt und im Anschluss 880 bis 1100 Meter tief im Meeresboden eingelagert.



5.25 > Die größten Mengen Kohlendioxid ließen sich an Land einlagern, weil dort die geologischen Voraussetzungen am besten sind. Eine Speicherung im Meeresuntergrund wird dennoch vielerorts in Betracht gezogen – unter anderem, weil mögliche Folgeschäden geringer ausfallen würden als in besiedelten Regionen.

gebunden ist. Fachleute sprechen an dieser Stelle von einer chemischen Neutralisation des Treibhausgases. Bis es so weit ist, vergehen allerdings etliche Jahrtausende.

CCS-geeignete Speichergesteine finden sich besonders häufig auf den Schelfen und in Randmeeren wie zum Beispiel der Nordsee. Deren Speicherkapazitäten allein sind so groß, dass sich darin schätzungsweise 150 Milliarden Tonnen Kohlendioxid speichern ließen, also in etwa das Dreieinhalbfache der jährlichen Gesamtemissionen aus Vor-Corona-Zeiten (2019: 42,3 Milliarden Tonnen CO_2). Weltweit gibt es mindestens 794 geologische Becken an Land und im Meer, in denen eine Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund theoretisch möglich wäre. Deren gemeinsames Speicherpotenzial wird auf etwa 8000 bis 55 000 Milliarden Tonnen Kohlendioxid geschätzt. Davon entfallen 2000 bis 13 000 Milliarden Tonnen auf Meeresgebiete, wobei in dieser Rechnung nur Küstengewässer (bis 300 Kilometer offshore, maximale Wassertiefe 300 Meter) berücksichtigt und die Polarmeere ausgeschlossen wurden.

Dennoch würden selbst großflächig angelegte CCS-Projekte allein nicht ausreichen, den Kohlendioxidausstoß der Menschheit in so engen Grenzen zu halten, dass es gelänge, das Pariser Klimaziel zu erreichen und die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu begrenzen. Dafür braucht es eine breite Palette weiterer Maßnahmen zur Reduktion der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre. Als Übergangslösung aber kommt CCS dennoch eine Schlüsselrolle zu, sagen Fachleute der Weltenergieagentur. Das Verfahren soll vor allem in jenen Industriebereichen zum Einsatz kommen, in denen sich Kohlendioxidemissionen vorerst nicht vermeiden lassen; etwa bei der Zementherstellung, in der Stahlproduktion, in der chemischen Produktion, bei der Stromgewinnung in Biomasse- oder Kohlekraftwerken sowie bei der Erdgasförderung und -veredlung.

Nach Berechnungen der Weltenergieagentur ließen sich existierende Kraftwerke und Industrieanlagen in einem solchen Umfang mit Abtrennungstechnik ausstatten, dass in den kommenden 50 Jahren weltweit rund 600 Milliarden Tonnen Kohlendioxid aufgefangen werden könnten. Das entspricht der 17-fachen Menge der aktuellen Gesamtemissionen des Industriesektors. Das so gewonnene Kohlendioxid müsste nicht vollständig im Untergrund gespeichert werden, sondern könnte auch für die Herstellung synthetischer Treibstoffe verwendet werden. Rohstoffexperten argumentieren außerdem, dass sich mithilfe von CCS kostengünstig Wasserstoff aus Erdgas gewinnen ließe. Dieser könnte dann als emissionsarmer Treibstoff oder Energieträger für neue Anwendungen im Verkehrswesen, in der Schwerindustrie oder in Gebäuden eingesetzt werden.

Zu guter Letzt käme die Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund aber auch für Projekte infrage, bei denen Kohlendioxid direkt aus der Atmosphäre entnommen und anschließend verflüssigt wird (englisch: Direct Air Capture). Noch sind solche Verfahren viel zu energieintensiv und damit zu teuer. Langfristig aber gehen Experten sehr wohl davon aus, dass unvermeidbare Emissionen durch die direkte Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre wieder ausgeglichen werden müssen. Anderenfalls bleibt das Ziel einer Nullemission nicht mehr als eine Wunschvorstellung.

Vergleicht man die Vor- und Nachteile einer Kohlendioxidspeicherung an Land mit jener im Meer, scheint der Meeresuntergrund die weniger risikobehaftete Option zu sein, weil es dort bislang kaum Infrastrukturen gibt, die ernsthaft Schaden nehmen könnten. Sollte zum Beispiel der Meeresboden leichte Erschütterungen erfahren, weil sich das Kohlendioxid im Untergrund ausbreitet, würde ein solcher Vorfall die Lebensgemeinschaften am Meeresboden vermutlich kaum stören. An Land aber könnten Häuser oder Straßen beschädigt werden. Außerdem können durch CCS-Projekte an Land dessen Grundwasserspeicher eventuell in Mitleidenschaft gezogen werden. Ihnen droht unter bestimmten Umständen eine Versalzung und Versauerung, im Zuge derer sich auch giftige Schwermetalle aus dem umliegenden Gestein lösen könnten. Im Meer wären solche Auswirkungen auf mögliche Grundwasserreservoirs zu vernachlässigen – vorausgesetzt, diese werden nicht zur Trinkwassergewinnung genutzt oder eingeplant.

Ähnlich verhielte es sich bei einem ungewollten Austritt von Kohlendioxid aus dem Untergrund. An Land würde das Treibhausgas direkt in die Atmosphäre entweichen; im Meer aber löst sich das austretende Kohlendioxid sofort im Wasser und führt zu dessen Versauerung. Ein großes Leckageexperiment europäischer Meeresforscher in der schottischen Nordsee hat jedoch ergeben, dass diese Versauerung nur kleinräumig auftritt, das heißt in einem Umkreis von zehn bis 20 Metern um die Austrittsstelle herum. Liegt diese auch noch in einem Gebiet mit spürbaren Strömungen oder Gezeiten, verdünnen diese das versauerte Wasser und begrenzen dadurch dessen unmittelbare schädliche Auswirkungen auf die marine Tier- und Pflanzenwelt.

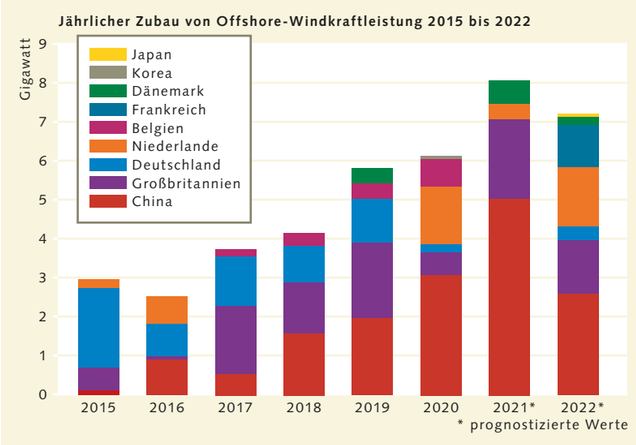
Das Leckageexperiment diente auch dazu, herauszufinden, welche Technik zum Einsatz kommen müsste, um Lagerstätten von Kohlendioxid im Meeresuntergrund zuverlässig und günstig über lange Zeit hinweg zu überwachen. Die Betreiber der beiden norwegischen CCS-Anlagen im Meer führen regelmäßig seismische Untersuchungen des Untergrundes durch. Auf den dabei entstehenden Profilen des Meeresbodens können Experten verfolgen, bis in welche Gesteinsschichten das flüssige Kohlendioxid vorgedrungen ist. Ergänzend dazu bietet sich nach Auffassung der Fachleute ein Beobachtungsnetzwerk aus Geophonen und passiv lauschenden Robotersystemen an. Die Geophone würden auf dem Meeresboden verteilt werden und Geräusche von Druckausgleichsbewegungen, Rissen oder Beben im Untergrund aufzeichnen. Die Roboter hätten die gleiche Aufgabe, nur wären sie im Gegensatz zu den Geophonen beweglich. Das heißt, sie könnten den Meeresboden über der Lagerstätte abfahren und auf Anzeichen für Schwachstellen, Erschütterungen oder Leckagen untersuchen.

Vom Untergrund der Nordsee weiß man, dass er von rund 20 000 Bohrlöchern durchzogen ist. Hinzu kommen auf natürliche Weise entstehende Risse, Spalten oder Schlote. Der Untergrund ist demzufolge löchrig wie ein Sieb. Aus rund 4000 der Bohrlöcher entweicht heute schon Methan aus dem Meeresboden. In ihrer Nähe Kohlendioxid in den Untergrund einzuspeisen, würde weitere Leckagen provozieren. Es wird deshalb zumindest in der Nordsee keine leichte Aufgabe werden, potenzielle Lagerstätten für Kohlendioxid zu finden, die alle Anforderungen erfüllen. Das heißt,

- die dicht genug vor der Küste angesiedelt werden können, um hohe Transportkosten zu vermeiden;
- die in einem Meeresgebiet liegen, in dem die Kohlendioxidspeicherung rechtlich erlaubt ist;
- deren Speichergestein und darüber liegende Barriereschicht großflächig intakt sind;
- die noch nicht anderweitig genutzt oder verplant sind – sei es als Schifffahrtsstraße, Naturschutzgebiet oder als Standort eines künftigen Windparks.

Im Falle der Nordsee bleiben da am Ende gar nicht mehr so viele Meeresflächen übrig. Dieser Umstand hat die Bundesregierung veranlasst, ein nationales Forschungsprojekt zu den Möglichkeiten und rechtlichen

Terawattstunden
Ein Terawatt entspricht 1000 Gigawatt oder einer Million Megawatt. Alle drei Einheiten beschreiben eine Leistung, die im Falle eines Windrades zum Beispiel angibt, welche maximale Energiemenge die Anlage zu einem bestimmten Zeitpunkt in das Stromnetz einspeisen kann. In Tera-, Giga- oder Megawattstunden dagegen gibt man an, wie viel Energie dieses Windrad innerhalb einer Stunde produziert – es geht hierbei also um die Frage, wie viel Strom tatsächlich innerhalb einer Stunde geflossen ist, und nicht um die Spitzenleistung.



5.26 > Die Offshore-Windbranche wächst, jedoch nicht in allen Regionen der Welt gleichmäßig. Die größten jährlichen Kapazitätszuwächse verzeichneten im Zeitraum von 2015 bis 2020 Nationen wie Großbritannien, China, Deutschland und die Niederlande.

Rahmenbedingungen von CCS-Projekten in deutschen Hoheitsgewässern ins Leben zu rufen. Die Fachleute haben im August 2021 ihre Arbeit aufgenommen; eine Zusammenfassung ihrer Ergebnisse wird für das Jahr 2024 erwartet.

Ob die großflächige Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund am Ende tatsächlich Wirklichkeit wird in Deutschland, Europa und darüber hinaus, ist und bleibt aber in erster Linie eine ökonomische Entscheidung. Steigen die Abgaben auf Treibhausgasemissionen nicht weiter an, hat die Industrie keinerlei Anlass, in teure CCS-Projekte zu investieren und diese voranzutreiben.

Hoffnungsbranche Offshore-Windkraft

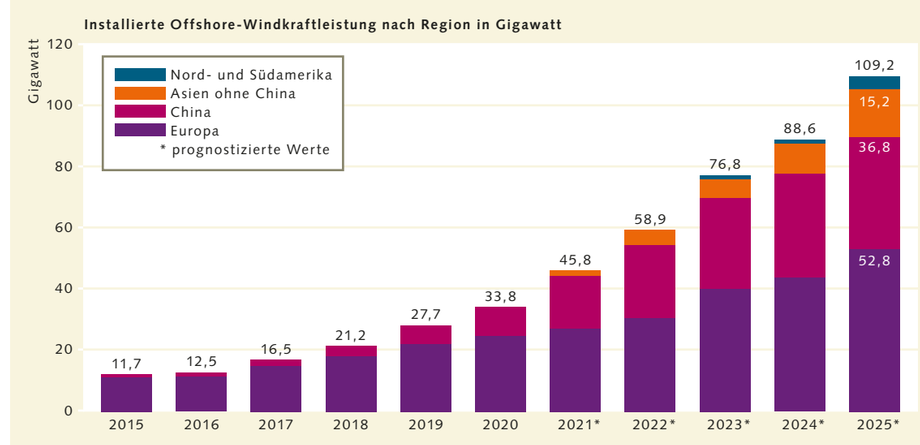
Die Analyse der Internationalen Energieagentur klingt vielversprechend: Würde der Mensch in allen küstennahen, für den Bau von Windkraftanlagen geeigneten Meeresgebieten die Turbinen auch tatsächlich errichten und sie an das Stromnetz anschließen, könnten diese Offshore-Windparks zusammen rund 36 000 Terawattstunden Strom pro Jahr erzeugen. Genug, um die gesamte Wirtschaft und alle Haushalte der Welt mit Strom aus erneuerbaren Energien zu versorgen – zumindest bis zum Jahr 2040 und vielleicht auch darüber hinaus, wenn der Stromverbrauch entgegen allen Erwartungen doch nicht weiter ansteigen sollte. Zum Vergleich: Im Jahr 2019 verbrauchte die Menschheit insgesamt 23 000 Terawattstunden Strom. Etwa 0,3 Prozent dieser Menge stammte von Windrädern auf dem Meer.

Die Dringlichkeit, Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu gewinnen, steigt mit jedem Tag. Gründe dafür sind nicht nur der fortschreitende Klimawandel, sondern auch die zunehmende Elektrifizierung aller Lebens- und Wirtschaftsbereiche, einschließlich des Transportsektors, der Wärmeversorgung und der in zunehmendem Maß benötigten Kühlung.

Der Strom für Klimaanlagen, Heizung, Roboter, Maschinen, E-Mobilität, Computer und Mobiltelefone aber stammt derzeit noch immer zu mehr als zwei Dritteln aus Kohle- und Gaskraftwerken, obwohl grüner Strom, das heißt Strom aus erneuerbaren Energien, mittlerweile viel günstiger ist. Sein Anteil lag Ende 2018 bei 26 Prozent der global produzierten Strommenge. Wenn die Menschheit das Pariser Klimaziel einhalten will, bleiben ihr weniger als 30 Jahre, dieses Verhältnis nicht nur umzukehren, sondern die Strom- und Wärmegewinnung aus fossilen Brennstoffen bis zum Jahr 2050 vollends einzustellen.

Windkraftanlagen auf dem Meer spielen auf diesem Weg aus vier Gründen eine besondere Rolle. Erstens haben sie im Vergleich zu Windrädern an Land den großen Vorteil, dass der Wind auf dem Meer in der Regel stärker und häufiger weht. Es kann also mehr und länger anhaltend Strom erzeugt werden. Zweitens ist der Widerstand der Bevölkerung gegen Windparks auf dem Meer vielerorts kleiner als gegen Anlagen an Land. Bauprojekte haben somit eine größere Chance, genehmigt zu werden. Drittens ist das mögliche Ausbaupotenzial der Offshore-Windenergie das größte aller bekannten Technologien zur Gewinnung von Strom aus erneuerbaren Quellen. Zu guter Letzt können Offshore-Windfarmen auch in der Nähe kleinerer Inseln (wenig Landfläche, Import fossiler Brennstoffe) oder aber in abgelegenen Küstenregionen (schlechte Versorgung mit fossilen Brennstoffen) errichtet werden und somit maßgeblich dazu beitragen, energietechnisch bislang unterversorgte Gegenden mit ausreichend kostengünstigem, sauberem Strom zu versorgen – eines der 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung, formuliert von den Vereinten Nationen (englisch: Sustainable Development Goals, SDGs).

Aufgrund dieser Ausgangslage und des zunehmenden gesellschaftlichen Handlungsdrucks hat der Ausbau der



5.27 > Weltweit investieren Küstenstaaten massiv in den Ausbau der Offshore-Windenergie. Werden alle bislang geplanten Projekte umgesetzt, sind im Jahr 2025 Meereswindparks mit einer gesamten Energieleistung von rund 110 Gigawatt an die Stromnetze angeschlossen.

Offshore-Windenergie in den zurückliegenden Jahren deutlich zugenommen – getrieben vor allem durch Investitionen großer erdölfördernder Konzerne. Im Zeitraum von 2010 bis 2019 wuchs der Offshore-Windenergiemarkt um etwa 30 Prozent pro Jahr – von drei Gigawatt installierter Gesamtleistung im Jahr 2010 auf 29 Gigawatt Ende 2019. Zu diesem Zeitpunkt waren weltweit mehr als 5500 Offshore-Windkrafträder an das Stromnetz angeschlossen.

Bis zum Jahr 2024 sollen nach Angaben der Weltenergieagentur weitere 150 Windparkprojekte auf dem Meer fertiggestellt werden, sodass ein Jahr später bereits jede fünfte Kilowattstunde Windstrom von einem Offshore-Windrad stammen wird.

Die wachsende Zahl der Windräder in der deutschen Nordsee setzte bereits im Jahr 2020 ein Achtungszeichen. Nach Angaben des Netzbetreibers Tennet lieferten die Turbinen mit einer Gesamtleistung von 6679 Megawatt über das Jahr gerechnet insgesamt 22,76 Terawattstunden Strom – eine Ausbeute, so groß wie nie zuvor. Mit dieser Energiemenge ließen sich rein rechnerisch rund sieben Millionen Haushalte ein Jahr lang mit grünem Strom versorgen.

Die Technologien und das Know-how für den Bau und den Betrieb von Windkraftanlagen auf dem Meer wurde vor allem in Deutschland, Großbritannien und Dänemark entwickelt. Die Bundesrepublik und das Vereinigte Königreich führten im Jahr 2019 auch noch die Liste der größten Offshore-Windkraftstromproduzenten an. Die größten Investitionen in den Bau neuer Windparks auf dem Meer aber tätigt derzeit China.

Größere Windräder, günstigere Strompreise

Die neueste Generation der Offshore-Windräder ist mit größeren Turbinen und vielerlei anderen verbesserten technischen Funktionen ausgestattet, um den Wind so effektiv wie möglich zu nutzen. Ein Rechenbeispiel: Wenn im Jahr 2023 vor der Küste von Yorkshire (England) das erste Teilstück der neuen Nordsee-Windfarm Dogger Bank ihren Dienst aufnehmen wird, erzeugt jede der errichteten 13-Megawatt-Turbinen mit einer vollständigen Umdrehung ihres Rotors (Rotorblattlänge: 107 Meter) ausreichend Elektrizität, um einen englischen Haushalt zwei Tage lang mit Strom zu versorgen.

Außerdem werden neue Windfarmen wie Dogger Bank in einem größeren Abstand zur Küste (100 Kilometer und mehr) errichtet, weil weiter draußen auf See bessere Windbedingungen vorherrschen. Da in tieferem Wasser eine Gründung am Meeresboden teuer und technisch schwierig ist, forcieren Betreiber von Windparks mittlerweile die Entwicklung schwimmender Plattformen, wie sie auch bei der Offshore-Erdölförderung zum Einsatz kommen. 13 Versuchsanlagen gibt es bereits weltweit, so zum Beispiel in Frankreich, Portugal, Japan, Südkorea und

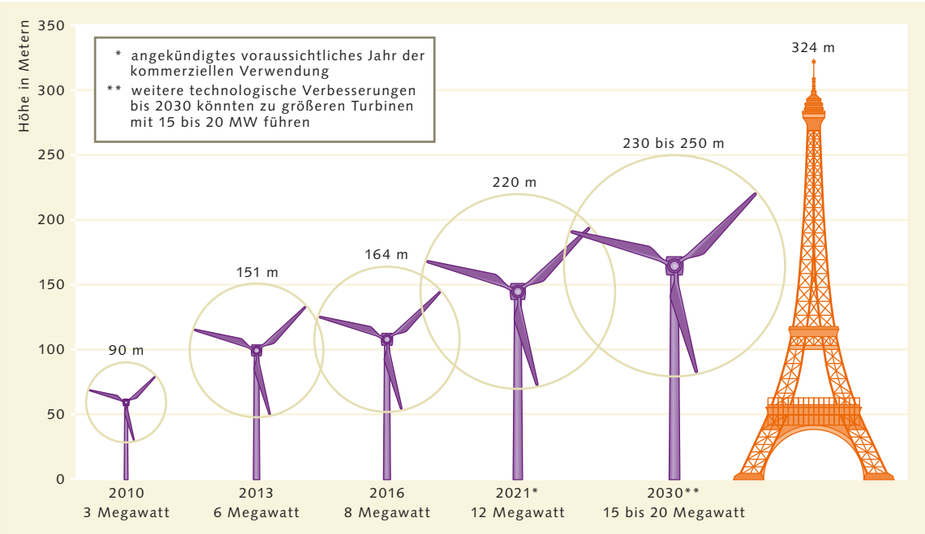
Schottland. Deren erste Leistungsbilanzen lassen hoffen. Nach Angaben des Betreibers der schottischen Anlage erzeugen die fünf schwimmenden Windkrafträder deutlich mehr Strom als vergleichbare bodenfeste Anlagen. Fachleute gehen deshalb davon aus, dass schwimmende Windfarmen bald schon in Serie produziert werden.

Aufgrund der vielen technischen Optimierungen erreichen moderne Offshore-Windräder mittlerweile einen Nutzungsgrad von 40 bis 50 Prozent und erzeugen somit genauso effizient Strom wie so manches Kohle- oder Gaskraftwerk – und das, obwohl der Wind nicht ständig weht. Offshore-Windräder sind auch effizienter als Anlagen auf dem Land und übertreffen den Nutzungsgrad von Photovoltaikanlagen um das Doppelte. Ein weiterer Vorteil: Im Gegensatz zu Photovoltaik können Offshore-Windkraftanlagen auch nachts Strom erzeugen – und bei nahezu jedem Wetter. In Europa, den USA und China produzieren Windparks auf dem Meer vor allem in den Wintermonaten besonders viel Strom. In Indien werden zur Monsunzeit die größten Elektrizitätsmengen generiert.

Nach Berechnungen der Weltenergieagentur dürften die Kosten für den Bau und Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen bis zum Jahr 2030 um mehr als 40 Prozent fallen, sodass der grüne Windstrom vom Meer zunächst günstiger zu erzeugen sein wird als Strom aus Kohle und Erdgas. Anschließend wird er voraussichtlich auch Strom aus Sonne und Wind an Land mächtig Konkurrenz machen. Die Fachleute der Weltenergieagentur sagen der Offshore-Windkraft daher ein großes Wachstum voraus. Bis zum Jahr 2040 soll sich die Menge der weltweit offshore produzierten Strommenge verfünfzehnfachen. Die Europäische Union allein will bis 2050 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 300 Gigawatt installieren.

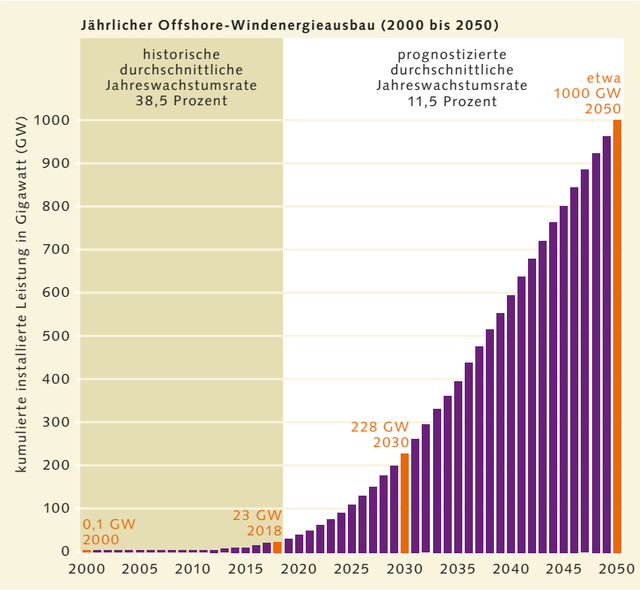
Aufgrund der fallenden Preise für Windstrom vom Meer wird er zunehmend als Energiequelle für die Herstellung von grünem – sprich emissionsarmem – Wasserstoff in Betracht gezogen. Dieser wird unter anderem benötigt, um Industrie, Verkehr und die Wärmeversorgung zu dekarbonisieren, das heißt, auf emissionsarme Energieträger umzustellen. Nur ein Beispiel: Die Strommenge einer Ein-Gigawatt-Offshore-Windfarm würde nach dem heutigen Stand der Technik genügen, um so viel grünen Wasserstoff zu erzeugen, dass sich damit etwa 250 000 Wohnungen beheizen ließen. Die deutsche Bundesregierung hat im Januar 2021 ein großes Forschungsprojekt (H2Mare) in Auftrag gegeben, in dem Möglichkeiten entwickelt werden sollen, grünen Wasserstoff und seine Folgeprodukte wie Methan, Ammoniak, Methanol

Nutzungsgrad
Der Nutzungsgrad (englisch: capacity factor) einer Windkraftanlage beschreibt, welchen Anteil der maximal möglichen Energiemenge die Anlage innerhalb eines Jahres erzeugt hat. Als Maximalwert wird dabei jener Energieertrag angenommen, der produziert worden wäre, hätten das ganze Jahr hindurch optimale Windbedingungen geherrscht.



5.28 > Der technische Fortschritt macht es möglich: Moderne Offshore-Windkraftanlagen werden immer größer und höher. Mit ihren langen Rotorblättern fängt jede neue Anlage mehr Wind ein als Vorgängermodelle. Die Folge: Elektrizität aus Windenergie lässt sich in größeren Mengen und vor allem kostengünstiger erzeugen.

5.29 > Die Europäische Union setzt stark auf grünen Windstrom vom Meer. Bis zum Jahr 2050 will die Staatengemeinschaft Anlagen mit einer Gesamtleistung von 300 Gigawatt installieren.



5.30 > Das Pariser Klimaziel ist nur erreichbar, wenn die Menschheit ihren Energiesektor auf erneuerbare Energieformen umstellt. Berechnungen zufolge müsste der Offshore-Windsektor dafür bis zum Jahr 2050 auf eine Gesamtleistung von rund 1000 Gigawatt ausgebaut werden.

mithilfe von Offshore-Windrädern direkt auf See zu produzieren und dabei die Kosten der Wasserstoffproduktion gering zu halten.

Dennoch besteht kein Grund zur Euphorie: Um die Klima- und Nachhaltigkeitsziele der Staatengemeinschaft zu erreichen, müsste der Ausbau der Windparks auf dem Meer doppelt so schnell vorangehen wie bisher geschehen. Voraussetzung dafür sind jedoch:

- der ausdrückliche politische Wille sowie eine dazugehörige Offshore-Energiestrategie,
- ein klarer Rechtsrahmen,
- hohe Investitionen und
- Fortschritte in der Wettbewerbsfähigkeit, Forschung und Technologieentwicklung.

Die Politik muss vorangehen

Der Bau von Offshore-Windkraftanlagen war lange Zeit eine nationale Angelegenheit. Je größer die Windfarmen jedoch werden und je weiter ihr Standort auf das offene Meer hinausrückt, desto öfter ist eine grenzübergreifende Kooperation mehrerer Länder gefragt – zum einen aus Gründen der Raumplanung; zum anderen, wenn es um die Frage geht, in welche Netze der grüne Strom eingespeist werden soll. Benötigt wird daher der ausdrückliche Wille jedes einzelnen Küstenstaates, den Ausbau der Offshore-Windenergie voranzutreiben sowie für Großprojekte mit anderen Nationen zu kooperieren.

Diese Willensbekundung wird manifestiert, indem einzelne Staaten oder aber Staatengemeinschaften nationale oder gemeinsame Offshore-Windkraftstrategien erarbeiten. In ihnen werden die jeweiligen Ausbauziele vorgegeben, Entwicklungspfade beschrieben und Strategien für Forschung, Technologieentwicklung und Wissenstransfer skizziert, sodass ein langfristig verlässlicher Rahmen für Unternehmen und Investoren gegeben ist. Die Europäische Kommission beispielsweise hat ihre Strategie zur Nutzung des Potenzials der erneuerbaren Offshore-Energie im November 2020 veröffentlicht.

Ein elementarer Bestandteil der EU-Strategie ist das Bekenntnis zu einer systematischen und grenzübergreifenden Planung aller menschlichen Aktivitäten auf und im Meer (Raumplanung), bei denen eine wesentlich größere Zahl an Flächen und Standorten für die Installation bodenfester oder schwimmender Windfarmen ausgewiesen wird, ohne andere Nutzungsarten wie zum Beispiel Fischerei, Schifffahrt und Tourismus zu gefährden. Die Europäische Kommission empfiehlt den EU-Mitgliedstaaten außerdem, sich bei der Planung an Best-Practice-Beispielen zu orientieren – vor allem an erfolgreichen Pilotprojekten, die eine Mehrfachnutzung der Windfarmen oder der von ihnen besetzten Flächen erlauben; etwa durch die Kombination mit Fisch-, Muschel- oder Algenzucht in Aquakulturhaltung.

Zudem gilt es, alle von der Offshore-Windkraft Betroffenen von Anfang an in einen Dialog mit einzubeziehen. Nach Ansicht der Europäischen Kommission können Offshore-Energietechnologien nur dann wirklich nachhaltig und somit zukunftsfähig sein, wenn sie keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben und den wirtschaftlichen, sozialen und territorialen Zusammenhalt in der betroffenen Region nicht gefährden.

Ein einheitlicher rechtlicher Rahmen

Ein schneller Ausbau der Offshore-Windenergie erfordert Planungs- und Rechtssicherheit für alle Beteiligten sowie klar gegliederte und transparente Genehmigungsverfahren. Dazu gehören unter anderem:

- einheitliche Verfahren zur Bewertung und Minimierung möglicher Umweltauswirkungen (vor allem Lärm unter Wasser, Beeinträchtigung des Lebensraumes für Vögel und Meeressäuger, elektromagnetische Felder an Seekabeln);
- einheitliche Standards, Regularien und Genehmigungsverfahren für die Planung und die Errichtung von Offshore-Windparks;
- einheitliche Regularien zur Anbindung der Offshore-Windfarmen an das Festland und eine effiziente Stromeinspeisung in die Netze;
- einheitliche Standards und Regularien für den Betrieb und die Wartung von Offshore-Windkraftanlagen sowie zum Schutz der Sicherheit und Gesundheit aller Beschäftigten.

Hohe Investitionen

Offshore-Windräder zu errichten, verschlingt viel Geld. Wer im Jahr 2018 eine Windfarm mit einer Nennleistung von einem Gigawatt bauen wollte, musste mit Investitionen in Höhe von vier Milliarden US-Dollar rechnen. Seitdem aber sinken die Baukosten, gleichzeitig steigen die weltweiten Investitionen in Offshore-Windfarmen. Im Jahr 2020 schossen sie im Vergleich zum Vorjahr um 56 Prozent in die Höhe und beliefen sich am Ende auf 50 Milliarden US-Dollar. Die Europäische Union schätzt die Kosten für den anvisierten Kapazitätsausbau auf eine Leistung von 300 Gigawatt auf bis zu 800 Milliarden Euro.

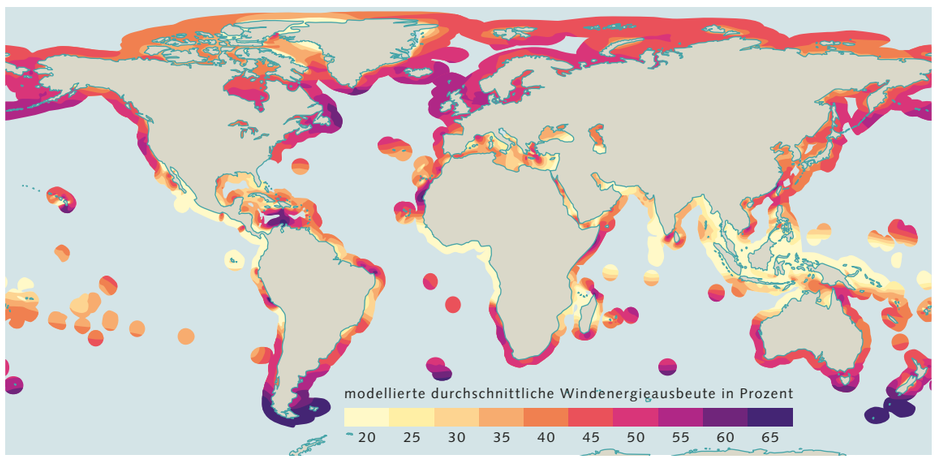
Ein großer Teil des Geldes wird dabei für den Ausbau der Stromnetze und grenzüberschreitender Verbindungsleitungen benötigt, denn ohne sie kann der grüne Windstrom nicht weiträumig verteilt werden. Die Nordseeanrainerstaaten planen zudem den Zusammenschluss mehrerer Offshore-Windfarmen in Knotenpunkten oder hybriden Projekten, über deren Verbindungsnetz gleichzeitig mehrere Staaten mit Elektrizität versorgt werden.

Wettbewerbsfähigkeit, Forschung, Technologieentwicklung

Um die Kosten für grünen Strom aus Offshore-Windfarmen zu senken, bedarf es zum einen effizienter und wettbewerbsfähiger Lieferketten für alle benötigten Bauteile und Dienstleistungen. Zum anderen muss die Versorgung mit allen für den Bau der Windkraftanlagen benötigten Metallen (insbesondere den Metallen der Seltenen Erden) weit in die Zukunft gesichert werden. Es gilt außerdem, Forschung und technische Entwicklung voranzutreiben. Unbeantwortet sind bisher zum Beispiel Fragen wie:

- Wie müssen in einer großen Windfarm die einzelnen Turbinen angeordnet sein, um den Wind optimal zu nutzen und sich nicht gegenseitig zu behindern?

Grüner Wasserstoff
Wasserstoff ist ein farbloses Gas. Abhängig von seinem Ursprung trägt er jedoch verschiedene Farben in seinem Namen: Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen durch die Spaltung von Erdgas gewonnen. Dabei entstehendes Kohlendioxid wird in die Atmosphäre abgegeben. Bei blauem Wasserstoff wird dieses Kohlendioxid abgeschieden und gespeichert. Es gelangt so nicht in die Atmosphäre. Grüner Wasserstoff wird durch Wasserelektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt. Die Herstellung ist kohlendioxidfrei.



5.31 > In den gemäßigten und höheren Breiten wehen die Winde stärker und beständiger, sodass die Windausbeute deutlich höher wäre als in den Tropen.

Meeresenergie: Auf diese Technologien setzt die Europäische Union

Offshore-Windräder sind nicht die einzige Technologie, um grünen Strom auf oder im Meer zu erzeugen. In dieselbe Kategorie fallen eine Reihe weiterer emissionsfreier Energietechnologien, die sich in ganz unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden, langfristig aber durchaus das Potenzial haben, lokal, regional oder sogar weltweit zum Einsatz zu kommen. Die Europäische Kommission berücksichtigt in ihrer Offshore-Energiestrategie die folgenden Technologien für Meeresenergie:

Strömungs- und Gezeitenkraftwerke

Strömungs- und Gezeitenkraftwerke gehören zu den technisch am weitesten entwickelten Technologien zur Stromproduktion im Meer. Sie nutzen die Fließbewegung von Wassermassen infolge der Gezeiten oder anderer natürlicher Meeresströmungen, um Elektrizität zu erzeugen.

Für Gezeitenkraftwerke in der sogenannten Staudamm-Bauweise wurden einst Meeresbuchten durch einen Deich abgetrennt. In diesem Deich wiederum installierte man große Röhren mit Turbinen, durch die das auf- oder ablaufende Wasser hindurchströmen konnte. Wann immer dies geschah, drehten sich die Turbinen und erzeugten Strom. Dieses Prinzip funktioniert in beide Richtungen, erfordert allerdings einen besonders hohen Tidenhub, den es nur an wenigen Küsten der Welt gibt. Da das Eindeichen von Buchten und Ästuarien zudem mit hohen Kosten und weitreichenden Umweltauswirkungen verbunden ist, wurden weltweit nur einige wenige Staudamm-Gezeitenkraftwerke errichtet – darunter ein 240-Megawatt-Kraftwerk in Frankreich sowie eine 254-Megawatt-Anlage in Südkorea.

Der Bau weiterer Kraftwerke dieses Typs ist unwahrscheinlich. Fachleute setzen mittlerweile auf sogenannte Meeresströmungskraftwerke, bei denen große Rotorturbinen an einem Mast oder an einem Kabel befestigt in der Strömung postiert werden. Moderne Strömungsturbinen sehen aus wie der Rotor eines Windrades und erzeugen inzwischen bis zu 1,5 Megawatt. Das bislang größte Strömungskraftwerk der Welt ist das MeyGen-Projekt im Norden Schottlands. Dessen erste vier Unterwasserrotoren nahmen im April 2018 offiziell ihren Betrieb auf und erzeugen nun verlässlich und berechenbar Strom für 2600 Haushalte. Weitere Strömungskraftwerke befinden sich im Bau, sodass die weltweit installierte Gesamtleistung im Jahr 2025 die Ein-Gigawatt-Marke übertreffen wird. Theoretisch nutzbar wäre jedoch ein Vielfaches mehr: Experten gehen davon aus, dass sich mit Strömungs- und Gezeitenkraftwerken bis zu 1200 Terawatt Strom erzeugen ließen. Noch aber sind die Kosten für diese Art der Stromerzeugung zu hoch.

Wellenkraftwerke

Mit Wellenkraftwerken ließen sich theoretisch bis zu 29 500 Terawattstunden Strom pro Jahr erzeugen – vor allem in den windreichen gemäßigten Breiten beider Hemisphären (30. bis 60. Breitengrad). Technische Ansätze gibt es bislang einige, doch keiner konnte wirklich überzeugen. Versuchsanlagen bestehen in der Regel aus einem an der Meeresoberfläche treibenden Schwimmkörper, der am Meeresboden verankert ist und Energie erzeugt, indem er sich mit den Wellen auf und ab bewegt. Weltweit installiert sind derzeit Pilotanlagen mit einer Leistung von 2,5 Megawatt. Aufgrund von Fortschritten in der technischen Entwicklung gehen Fachleute jedoch davon aus, dass die in Wellenkraftwerken erzeugte Strommenge schon bald auf 100 Megawatt und mehr steigen wird. Die Europäische Union will ihren in Wellen-, Strömungs- und Gezeitenkraftwerken erzeugten Stromanteil bis zum Jahr 2050 auf 40 Gigawatt erhöhen.

Schwimmende Photovoltaik

Die Idee, Photovoltaikmodule auf dem Wasser zu installieren, ist nicht neu und wird vor allem in Asien bereits auf Stau- oder Baggerseen praktiziert. Die bewährte Technologie wird nun schrittweise auf das Meer übertragen. Ein niederländisches Konsortium installierte im Februar 2018 eine Pilotanlage mit 8,5 Kilowatt Leistung auf der Nordsee und plant, diese schrittweise bis auf 100 Megawatt auszubauen. Südkorea ist da schon einen Schritt weiter. Das Land errichtet derzeit eine schwimmende Offshore-Photovoltaikgroßanlage mit einer Gesamtleistung von 2,1 Gigawatt an der Südwestküste der koreanischen Halbinsel. Der erste Teil dieser umgerechnet 3,96 Milliarden US-Dollar teuren Anlage soll Presseberichten zufolge 2022 an das Netz gehen, der zweite Teil drei Jahre später. Indien, Thailand, Vietnam, Singapur und die Seychellen treiben ebenfalls Pilotprojekte voran. Die Europäische Kommission bescheinigt der Technologie ein vielversprechendes Potenzial für Küsten und küstennahe Gebiete, verweist aber auch darauf, dass sich existierende Anwendungen auf dem Meer überwiegend in der Forschungs- oder Demonstrationsphase befinden.

Biokraftstoffe aus Algen

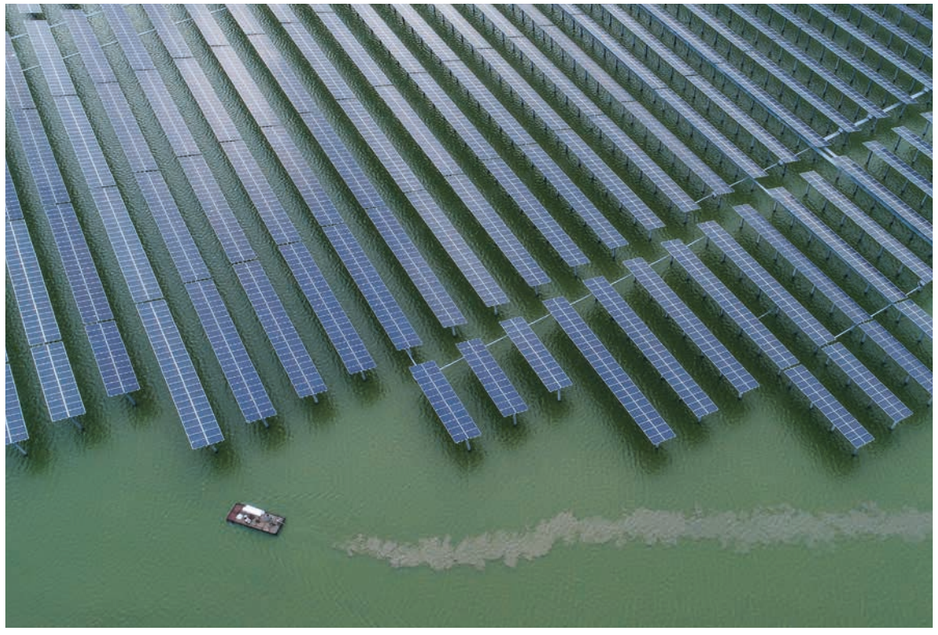
Im frühen Entwicklungsstadium befinden sich auch technische Lösungsansätze, mit denen Biodiesel, Biogas und Bioethanol aus Großalgen hergestellt werden können. Das Potenzial dieser Ansätze aber sei vielversprechend, urteilt die Europäische Kommission und rechnet mit einer Marktreife einzelner Technologien bis zum Jahr 2030.

5.32 > Eine der schnellsten Meeresströmungen Schottlands treibt die Unterwasserrotoren des MeyGen-Strömungskraftwerkes an. In einer ersten Phase hat die Betreiberfirma vier Turbinen am Meeresboden installiert, die seit August 2018 rund 2600 Haushalte mit Strom versorgen. Weitere Turbinen sollen folgen.

- Wie beeinflussen sich große Windfarmen gegenseitig – und wie verändern sie das lokale Wetter?
- Wie sollten Stromnetze aufgebaut und gesteuert werden, damit es gelingt, bei viel Wind große Mengen Strom aus verschiedenen Windfarmen einzuspeisen, zu verteilen und gegebenenfalls zwischenzuspeichern, sodass der Strom jederzeit dort verfügbar ist, wo er von Industrie und Haushalten benötigt wird?

Der massive Ausbau der Windenergie stellt Meeresforscher zudem vor die Herausforderung, zu ergründen, welche kurz- und langfristigen Umweltauswirkungen die intensive und großflächige Nutzung des Windes auf das Meer hat. Dass die Bauarbeiten eine enorme Lärmbelastung für die Meeresorganismen darstellen, weiß man seit Langem. Wie aber verändern sich zum Beispiel die windbedingte Durchmischung des Oberflächenwassers und damit auch der Sauerstoff- und Nährstoffaustausch mit tiefer liegenden Wasserschichten, wenn viele Windräder auf dem Meer den Luftstrom gewissermaßen ausbremsen? Würden in einem solchen Fall weniger Algen wachsen und am Ende sogar weniger Biomasse produziert werden? Theoretisch wäre eine solche Kettenreaktion denkbar – ob sie allerdings auch in der Praxis abläuft, müssen Fachleute erst noch untersuchen.

Sicher ist, dass mit dem Wachstum der Offshore-Windenergiebranche weltweit neue Arbeitsplätze entstehen. In der EU arbeiten heute schon 62 000 Menschen in diesem Sektor. Nach Berechnungen der Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien (International Renewable Energy Agency, IRENA) wird die Windenergiebranche im Jahr 2030 weltweit bis zu 3,74 Millionen Menschen beschäftigen – sowohl an Land als auch auf dem Meer. Bis zum Jahr 2050 könnte die Zahl der Mitarbeitenden auf mehr als sechs Millionen steigen. Offshore-Windfarmen liefern nicht nur einen entscheidenden Beitrag zur Umstellung unserer Energieversorgung auf Strom aus erneuerbaren Quellen; sie stellen zudem einen Schlüsselsektor der nachhaltigen Meereswirtschaft dar. Ohne Offshore-Windkraft sind eine nachhaltige Entwicklung der Welt sowie eine umfassende Dekarbonisierung unserer Wirtschaft zum jetzigen Zeitpunkt undenkbar.



5.33 > Photovoltaikanlagen werden bislang vor allem in flachen, vor Wind und Wellen geschützten Meeresbuchten errichtet. Ein Beispiel ist diese Anlage in der chinesischen Küstenstadt Zhangzhou.

Conclusio

Unsere Ozeane: voller Energie

Die Menschheit steht vor einer großen Aufgabe: Wenn es gelingen soll, die globale Erwärmung auf weit unter zwei Grad Celsius zu begrenzen, müssen die Energieversorgung der Welt und darin eingeschlossen das Transportwesen und die Wärmeversorgung auf emissionsarme oder emissionsfreie Technologien umgestellt werden. Nach bisherigem Kenntnisstand scheint eine solche Transformation ohne den Weltozean völlig ausgeschlossen. Die Weltmeere werden in gleich zwei Prozessstufen gebraucht – mit absoluter Sicherheit als Energiequelle und voraussichtlich auch als Rohstofflagerstätte.

Beim Thema Energiegewinnung aus dem Meer befindet sich die Menschheit an einer Wegegabelung. Noch immer werden neue Erdöl- und Erdgaslagerstätten im Meer erschlossen. Diese neuen Förderstätten liegen meist in größerer Tiefe als zuvor und in zunehmender Entfernung vom Land. Während die weltweiten Fördermengen für Erdöl aus dem Meer auf hohem Niveau stagnieren, steigen jene für Erdgas kontinuierlich an, sodass fossile Rohstoffe aus dem Meer mittlerweile mehr als ein Viertel der globalen Gesamtproduktion ausmachen. Gleichzeitig aber investieren weltweit vor allem erdölfördernde Konzerne in große Offshore-Windfarmen. Diese werden ebenfalls in zunehmender Distanz zur Küste errichtet, um von den besseren Windbedingungen auf offener See zu profitieren. Technische Fortschritte haben dazu beigetragen, dass moderne Windkraftanlagen deutlich größer sind als ihre Vorgängermodelle und auch deutlich mehr Strom produzieren. Infolgedessen sinken die Preise für grünen Offshore-Windstrom, und die Nachfrage steigt.

Aufgrund des hohen Windenergiepotenzials auf den Meeren zählt die Produktion von Offshore-Windenergie zu den wichtigsten Pfeilern nationaler und internationaler Strategien für eine nachhaltige Energiegewinnung. Andere Technologien wie Wellen- und Strömungskraftwerke, Photovoltaikanlagen auf dem Meer oder die Erzeugung von Biokraftstoffen aus Algen befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Langfristig aber müssen auch sie großflächig eingesetzt werden, um den wachsenden Strombedarf der Menschheit zu decken.

Der Ausbau der erneuerbaren Meeresenergien sowie die Stromverteilung und -speicherung gelingen jedoch nur, wenn entsprechende Kraftwerke, Stromtrassen und Batteriesysteme gebaut werden. Dafür werden immer größere Mengen an Rohstoffen benötigt, deren Förderung an Land den Lebensraum für Mensch und Tier großflächig zerstört. Eine denkbare Alternative wäre der Abbau großer Rohstofflagerstätten im Meer, insbesondere in der Tiefsee, welche im Gegensatz zu Lagerstätten an Land eine Vielzahl verschiedener Metalle und Mineralien enthalten. Das Wissen über diese Tiefseevorkommen ist in den zurückliegenden 20 Jahren deutlich gewachsen. 31 Lizenzen zur Erkundung des Meeresbodens nach mineralischen Rohstoffen hat die Internationale Meeresbodenbehörde ISA seit dem Jahr 2002 vergeben. Erste Abbautechniken wurden vor Ort getestet; parallel dazu führten Fachleute umfassende Untersuchungen zu den Umweltfolgen eines möglichen Tiefseebergbaus durch und entwickelten Überwachungssysteme. Die ISA erarbeitet und verhandelt derzeit ein Regelwerk für den Tiefseebergbau in internationalen Gewässern. Der wiederum könnte Experten zufolge in fünf bis zehn Jahren beginnen.

Umweltschützer fordern ein generelles Verbot des Bergbaus in den Meeren. Sie verweisen darauf, dass es angesichts der angespannten Rohstoffversorgungslage keine Lösung sei, weitere natürliche Ressourcenquellen zu erschließen. Stattdessen müsse der enorme Ressourcenverbrauch auf ein Minimum reduziert werden. Voraussetzung dafür ist jedoch eine grundsätzliche Umstrukturierung des auf Verbrauch angelegten Wirtschaftssystems und ein verändertes Konsumverhalten jedes Einzelnen.