

2 Tagebau am Meeresgrund



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



Rohstoffe für die Welt

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

Erz, Glimmer, Sand und Kies

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

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

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

Angst vor Lieferengpässen

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

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

Metalle der Seltenen Erden

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



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

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

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

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

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

Die Unsicherheit messen

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

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

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

Wie viel Metall steckt im Erz?

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

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

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

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

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

2.3 > Wie sicher die Versorgung mit einzelnen Rohstoffen ist, wird ermittelt, indem man die Zuverlässigkeit der Exportnationen (gewichtetes Länderrisiko) und die Monopolisierung der einzelnen Rohstoffmärkte betrachtet. Diese Grafik berücksichtigt insbesondere die Monopolstellung von Ländern (Länderkonzentration). Rohstoffe, für die die Versorgung als sicher gilt (geringes Risiko), sind grün unterlegt. Rohstoffe mit mittlerem Risiko sind gelb unterlegt. Rot unterlegt sind Rohstoffe, bei denen die Versorgungslage unsicher ist (hohes Risiko).



nehmer mit ihren jeweiligen Marktanteilen und kann somit eine Aussage über den Konzentrationsgrad treffen. Rein rechnerisch bewegt sich der HHI zwischen dem größten Wert 1 bei einem einzigen Marktteilnehmer, und damit einem Monopol, und dem kleinsten Wert 0, der erreicht wird, wenn (theoretisch) unendlich viele Marktteilnehmer den gleichen Anteil haben. Da sich Werte mit sehr vielen Dezimalstellen hinter dem Komma ergeben können, werden diese aus Praktikabilitätsgründen jeweils mit 10 000 multipliziert.

Gemäß dieser Darstellung gilt ein Rohstoffmarkt als wenig konzentriert, wenn der HHI unter 1500 liegt. Oberhalb von 2500 gilt ein Markt als stark konzentriert beziehungsweise monopolisiert. Werte dazwischen weisen auf eine mäßige Konzentration hin.

Bewertet man die Rohstoffe zugleich nach dem GLR und dem HHI, lassen sie sich 3 verschiedenen Risikogruppen zuordnen: Rohstoffen mit geringem Risiko, Rohstoffen mit mittlerem Risiko und Rohstoffen mit hohem Risiko. Zu den Rohstoffen mit geringem Risiko zählt Kupfer. Es hat einen geringen Länderrisikowert und zugleich geringe Fir-

men- und Länderkonzentrationswerte. Das liegt daran, dass Kupfer in politisch stabilen Staaten und von einer Reihe unterschiedlicher Unternehmen gefördert wird.

Zu den Rohstoffen mit besonders hohem Risiko zählen die Seltenelemente oder auch das Halbmetall Antimon. Vorkommen mit hohen Antimongehalten gibt es vor allem in China, das rund 84 Prozent der Weltproduktion liefert. Entsprechend hoch ist der HHI-Wert. Antimon wird für Touchscreens und mikroelektronische Bauteile benötigt und ist als Flammschutzmittel für feuerfeste Bekleidung und Kunststoffe sehr gefragt.

Wie lange reichen die Vorkommen?

Die Berechnung des Versorgungsrisikos liefert natürlich nur eine Momentaufnahme. Darüber, wie lange die Rohstoffe in Zukunft verfügbar sein werden, geben sie keine Auskunft. Diese Frage versuchen Geowissenschaftler zu beantworten, indem sie die Reserven und Ressourcen der verschiedenen Rohstoffe abschätzen. Grundsätzlich weiß man nämlich, wo bestimmte Erze zu erwarten sind. Denn

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

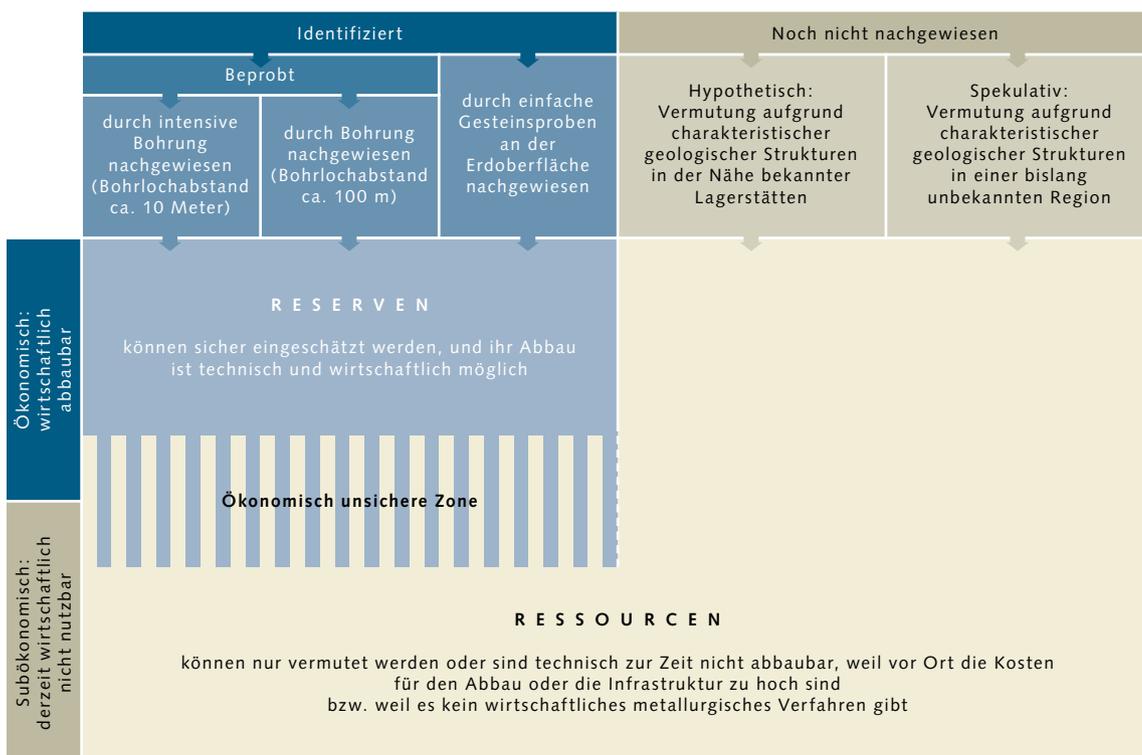
Platin etwa kommt vor allem in der südafrikanischen Bushveld-Region in einer geschichteten magmatischen Intrusion vor. Dabei handelt es sich um eine durch magmatische Aktivität entstandene Gesteinsschicht, die benachbarte Gesteinsschichten durchbrochen hat. Auch in anderen Regionen der Welt findet man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

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

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

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

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



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

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



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

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

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

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

Wiederverwerten statt wegwerfen?

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

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

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

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

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

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

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

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

Meeresbergbau als Alternative?

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

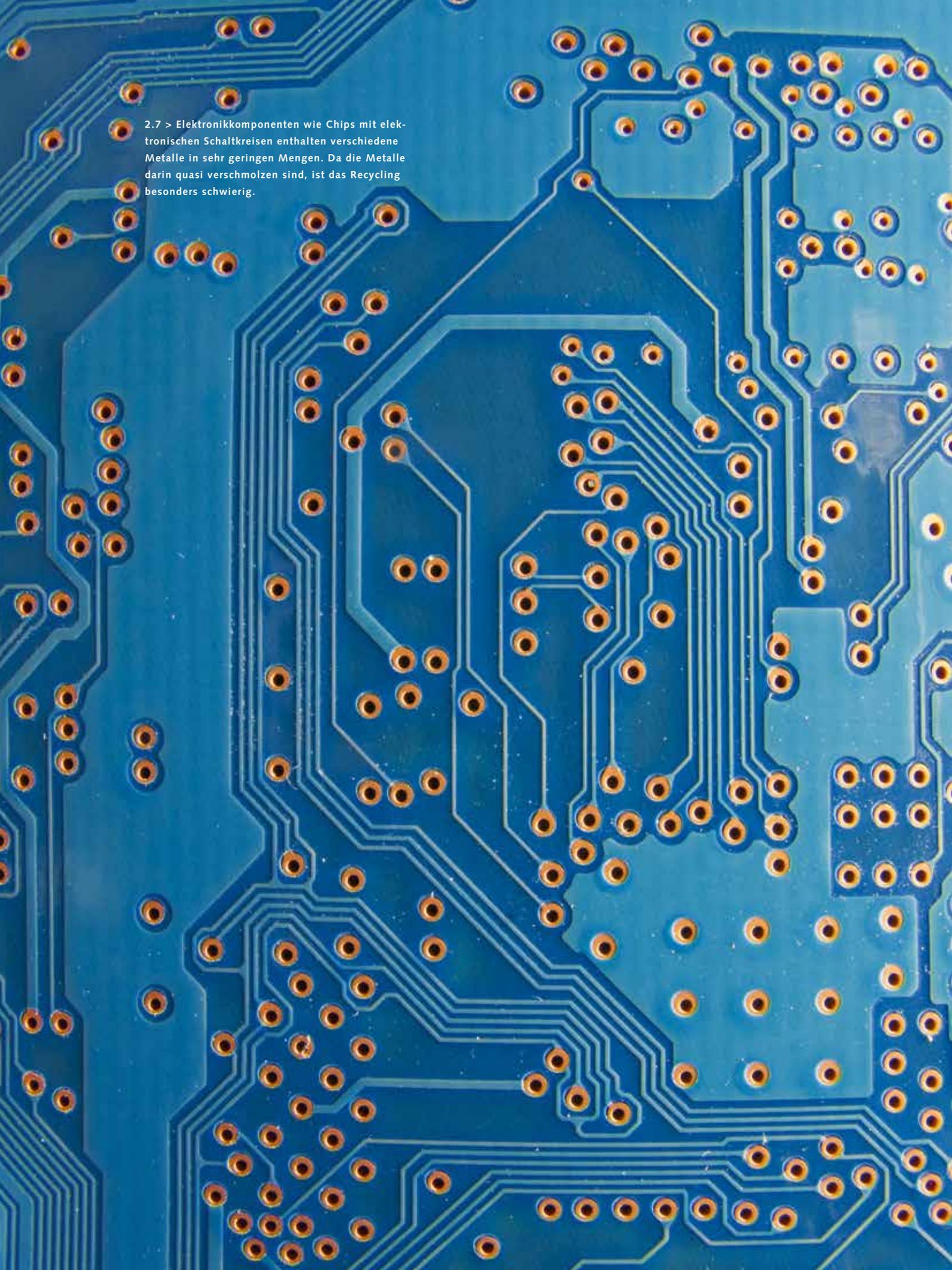
Grundsätzlich muss man beim Meeresbergbau 2 Situationen unterscheiden: den Bergbau in den Hoheitsgewässern eines Staates und den Bergbau im Bereich der Hohen See, die als Erbe der Menschheit und gemeinsame Ressource aller Staaten gilt.

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

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



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



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

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

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

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

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

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

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

Sand, Kies und Phosphat aus dem Meer

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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



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

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

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

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

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

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

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

Begehrte Manganknollen

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

Klumpen voller Metall

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

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

4 große Vorkommen

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

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

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

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

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

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

Vom Wachsen der Knolle

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

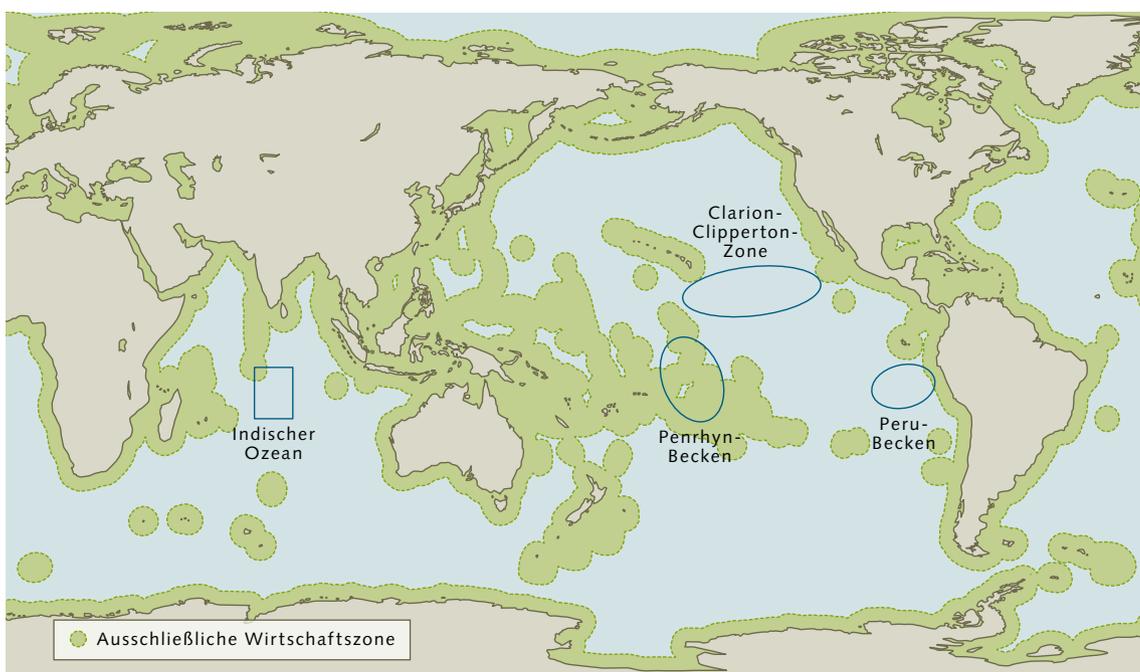


2.10 > Schnitt durch eine Manganknolle: In Jahrmillionen lagern sich Mineralien an einem Keim an.

Metallgehalte der Manganknollenvorkommen in Millionen Tonnen

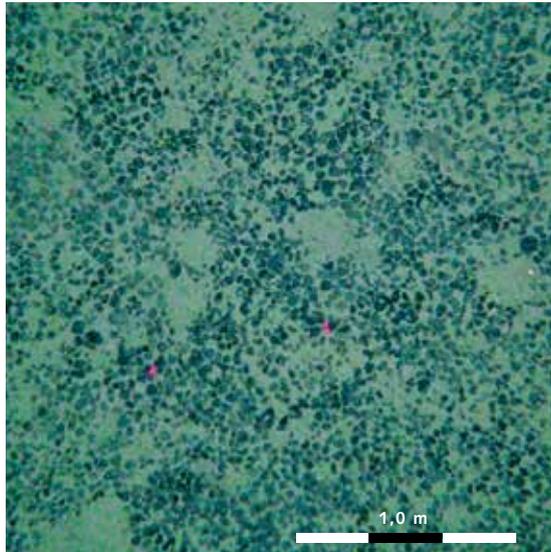
Elemente	Clarion-Clipperton-Zone (CCZ)	Globale Reserven und Ressourcen an Land (sowohl wirtschaftlich abbaubare als auch subökonomische Vorräte)	Globale Reserven an Land (heute wirtschaftlich abbaubare Vorräte)
Mangan (Mn)	5992	5200	630
Kupfer (Cu)	226	1000+	690
Titan (Ti)	67	899	414
Seltenerdoxide	15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

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



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

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



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

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

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

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

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

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

Andere Gegend, andere Rezeptur

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

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

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

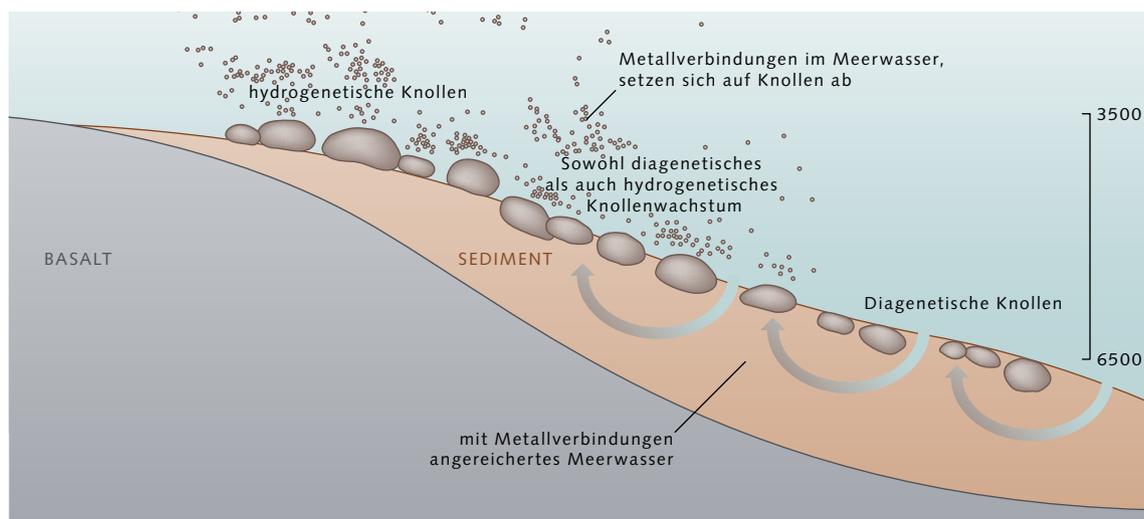
Wem gehören die Rohstoffe im Meer?

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

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

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

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



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

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

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

* Gramm pro Tonne ** Gewichtsanteil in Prozent

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

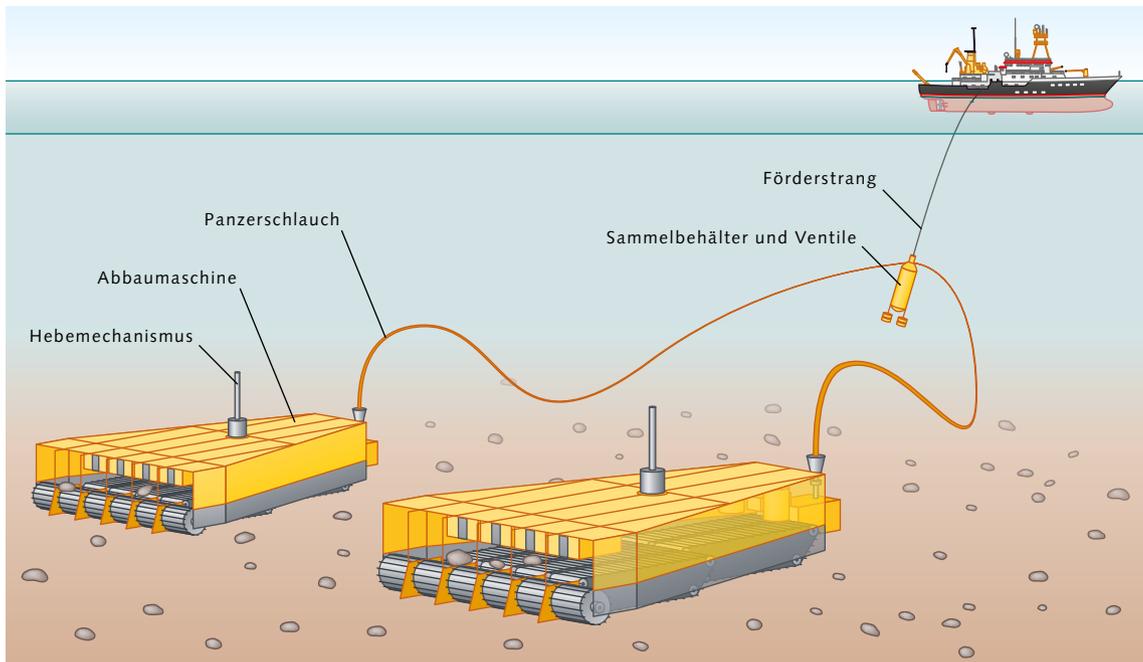
Vor Kurzem sind 2 Industrieunternehmen als Antragsteller hinzugekommen: die britische Firma UK Seabed Resources Limited und die belgische G-TEC Sea Mineral Resources NV. Seit 2011 haben auch einige Entwicklungsländer (Nauru, Kiribati und Tonga), die mit westlichen Firmen kooperieren, Anträge gestellt.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

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

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

Noch fehlen Abbaugeräte

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



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

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

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

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

Zerstörung der Tiefseelebensräume?

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

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

Belebte Manganknollenfelder

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Metallreiche Krusten

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

Seeberge

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

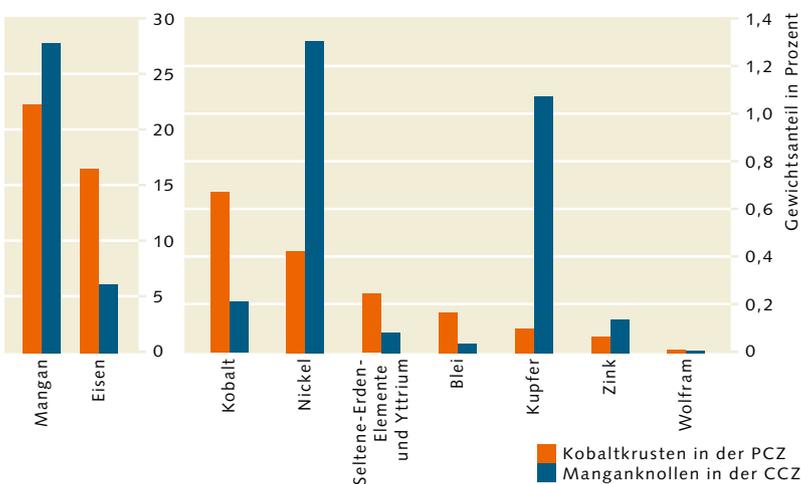
Deckschicht auf dem Fels

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

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

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

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

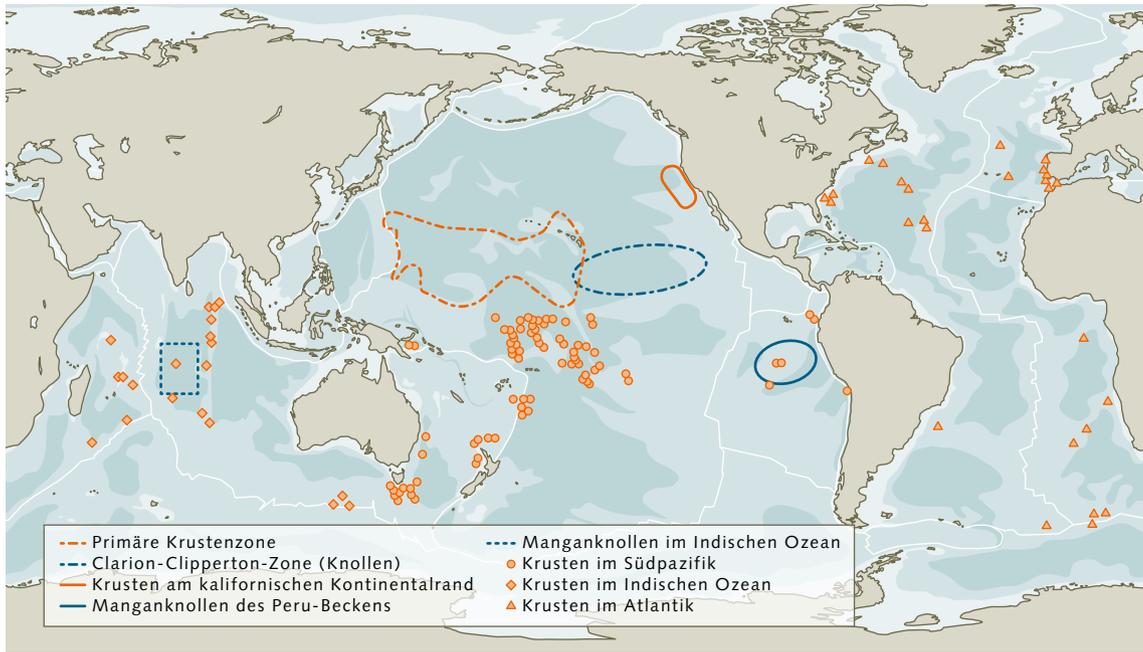


Eine Kruste, reich an Metallen

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

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

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



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

Metallgehalte in Millionen Tonnen

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

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

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

Stark umströmte Seeberge

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

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

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

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

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

Sauerstoff aus der Tiefe lässt Krusten wachsen

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

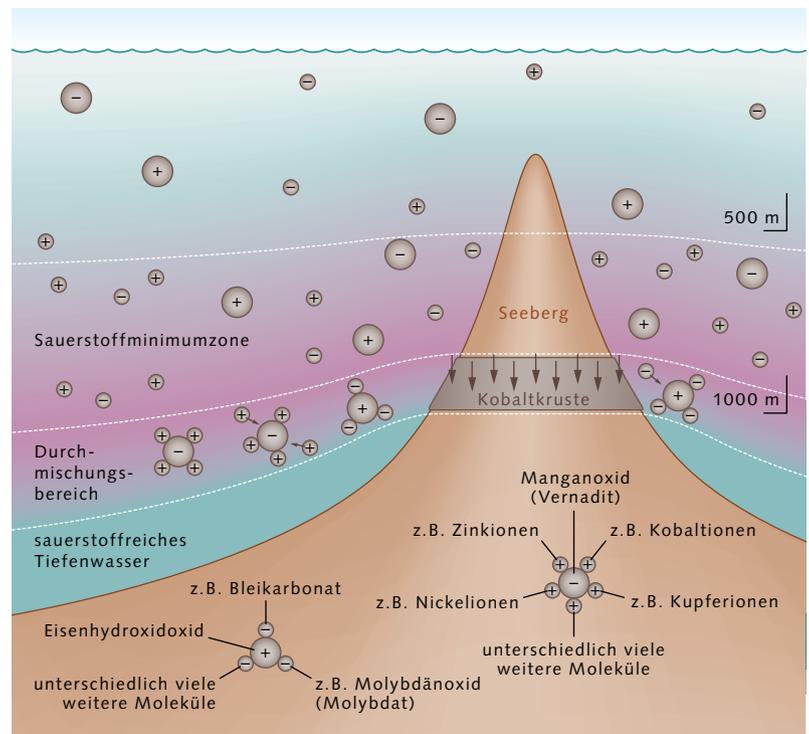
Krustenabbau in Hoheitsgebieten?

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

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

Schwierige Dickenmessung

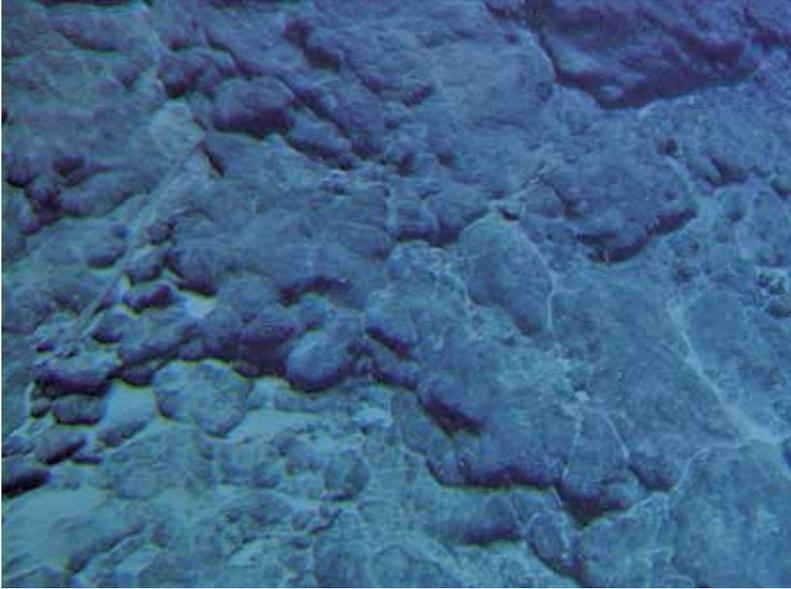
Auch in technischer Hinsicht unterscheidet sich die Exploration der Kobaltkrusten fundamental von der Situation bei den Manganknollen. Manganknollen können durch sogenannte Kastengreifer wie mit einer Baggerschaufel leicht und schnell an Bord geholt werden, um Proben zu nehmen und beispielsweise Metallgehalte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



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

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

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



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

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

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

Nicht viel mehr als Konzeptstudien

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

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

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

Artenreiche Seeberge

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nahezu unerforscht – das Leben auf den Kobaltkrusten

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

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



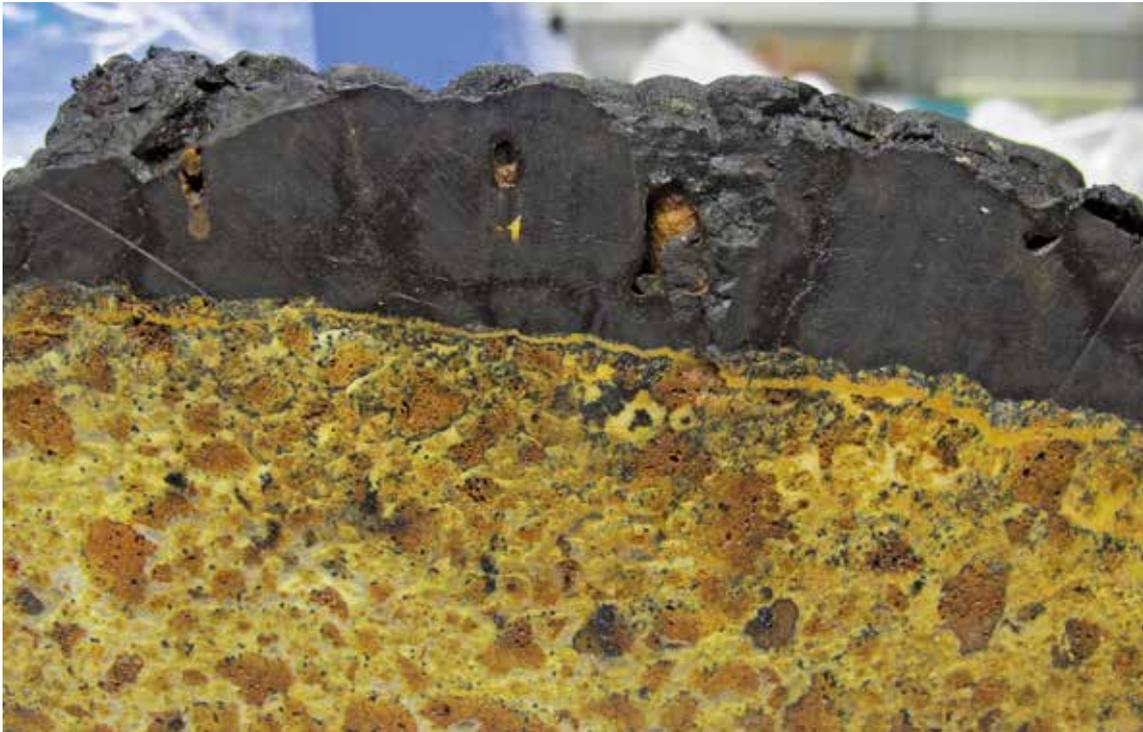
ist, sind solche Organismen gut an diesen Lebensraum angepasst. Alle diese Lebewesen zählen zu den Filtrierern, die Nahrungsteilchen aus dem Wasser sieben. Für sie sind Seeberge ein idealer Lebensraum, weil die Meeresströmung die Nahrung heranträgt. Des Weiteren fanden sich auf den Fotografien Krebse,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

Die Folgen des Bergbaus abschätzen

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

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

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



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

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

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

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

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

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

Massivsulfide – im Rauch der Tiefe

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

Ein extrem heißer Wasserstrahl

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

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

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

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

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

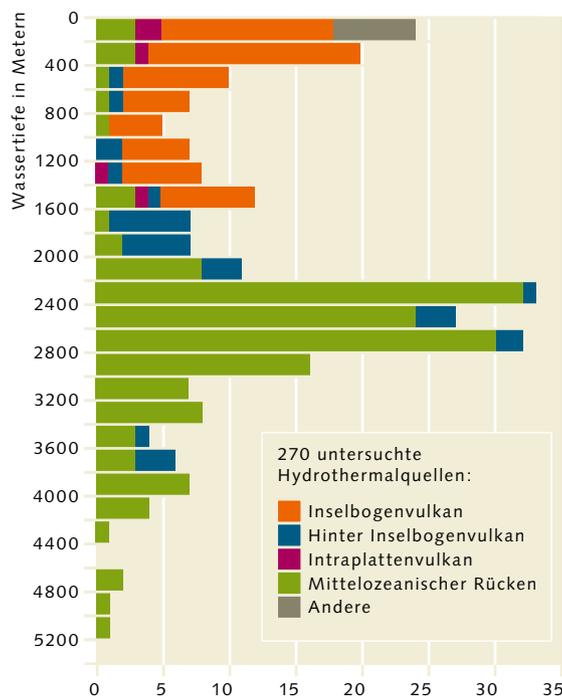
Heiße Quellen wurden inzwischen in allen Ozeanen gefunden. Sie bilden sich überwiegend in Wassertiefen von 1000 bis 4000 Metern.

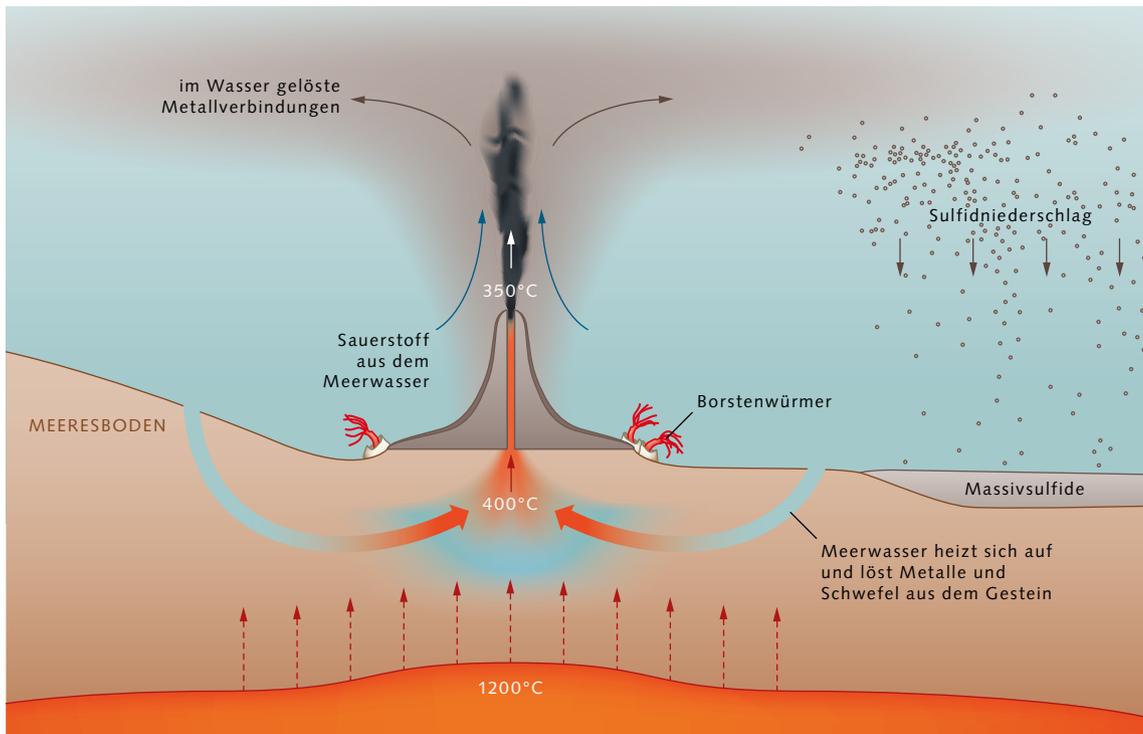
Massivsulfide kommen weltweit an Plattengrenzen vor. Geologen unterscheiden 4 verschiedene typische Entstehungsgebiete von Hydrothermalquellen und damit auch Massivsulfiden:

Sulfide

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

2.25 > Verteilung der Hydrothermalquellen nach Tiefe und Entstehungsort.





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

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

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

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

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

Schwarz, weiß, grau und manchmal sogar gelb

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

Ungezählte Hydrothermalquellen

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

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

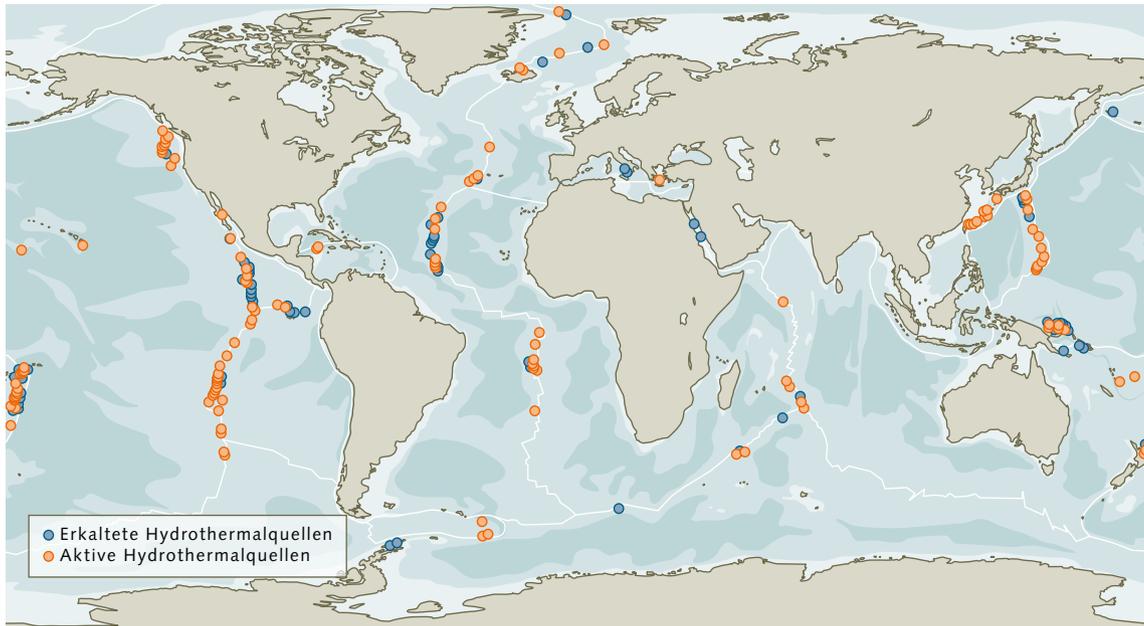
was der Leistung von 1 Million Atomkraftwerken entspricht. Ein Teil dieser Wärmemenge, so die Schätzungen, wird durch Hydrothermalquellen freigesetzt. Nach entsprechenden Berechnungen gehen einige Forscher davon aus, dass sich auf jedem Kilometer eines Mittelozeanischen Rückens oder einer Backarc-Spreizungszone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

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

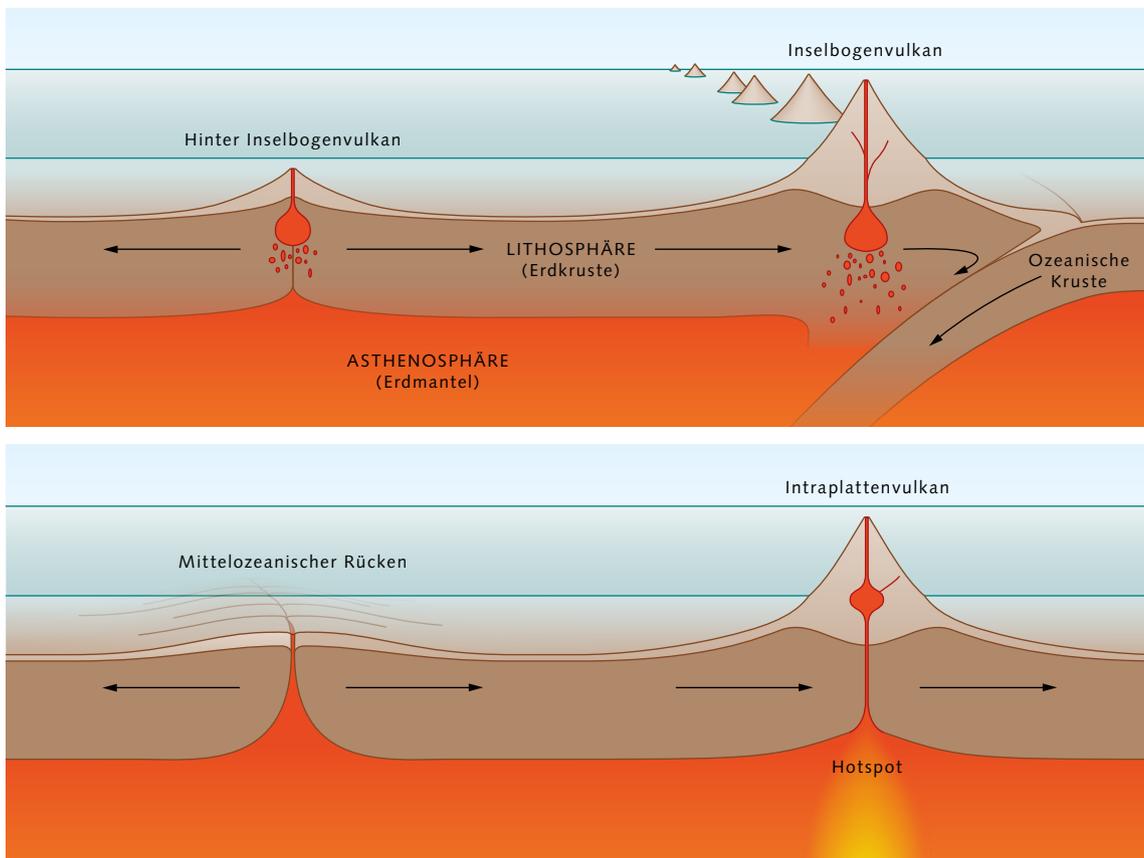
Aufgrund vieler Bodenanalysen, die in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführt wurden, gehen Forscher heute davon aus, dass sich nur an wenigen Hydrothermalquellen Massivsulfidvorkommen befinden, die begehrte Metalle wie Kupfer und Gold enthalten und tatsächlich groß genug für einen wirtschaftlichen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

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

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



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



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

Die mühevollen Suche nach Hydrothermalquellen und ergiebigen Massivsulfidvorkommen

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

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

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

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

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

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



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

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

Edler als Knollen und Krusten

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

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

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

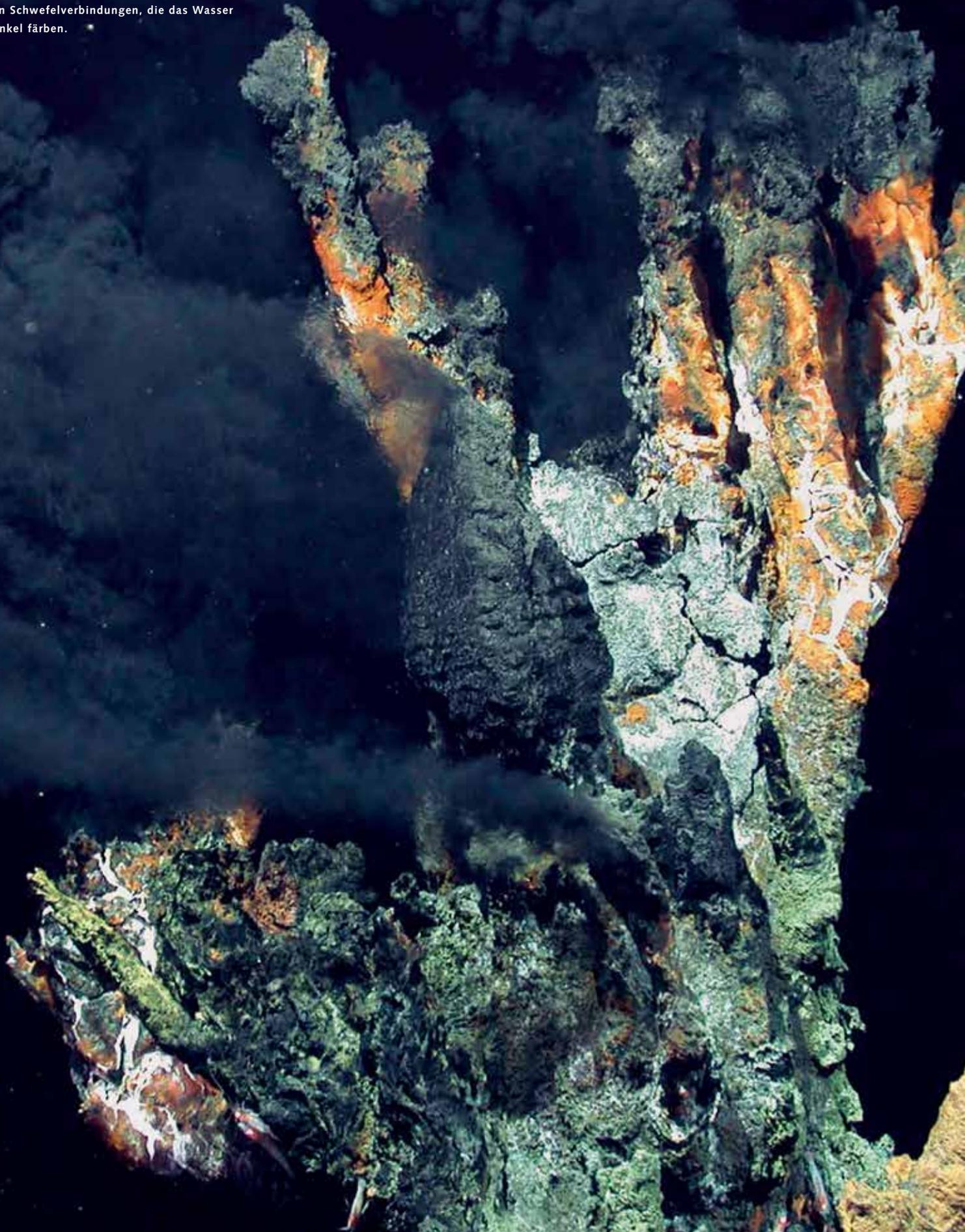
und Zink auf. Auch die Gehalte an Gold und Silber sind beachtlich. Die Konzentration von Gold liegt hier in manchen Vorkommen bei rund 15 Gramm pro Tonne. Das ist etwa 3-mal so viel wie in typischen Landlagerstätten. Der Silbergehalt liegt in vielen Fällen zwischen 100 und 300 Gramm pro Tonne, wobei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

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

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

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

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



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

Startschuss in der Südsee?

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

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



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

Wenige Explorationslizenzen

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

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

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

Extremer Lebensraum, viele Spezialisten

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

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

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

Was ist selten?

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

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

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

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

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

Metallschlamm im Roten Meer

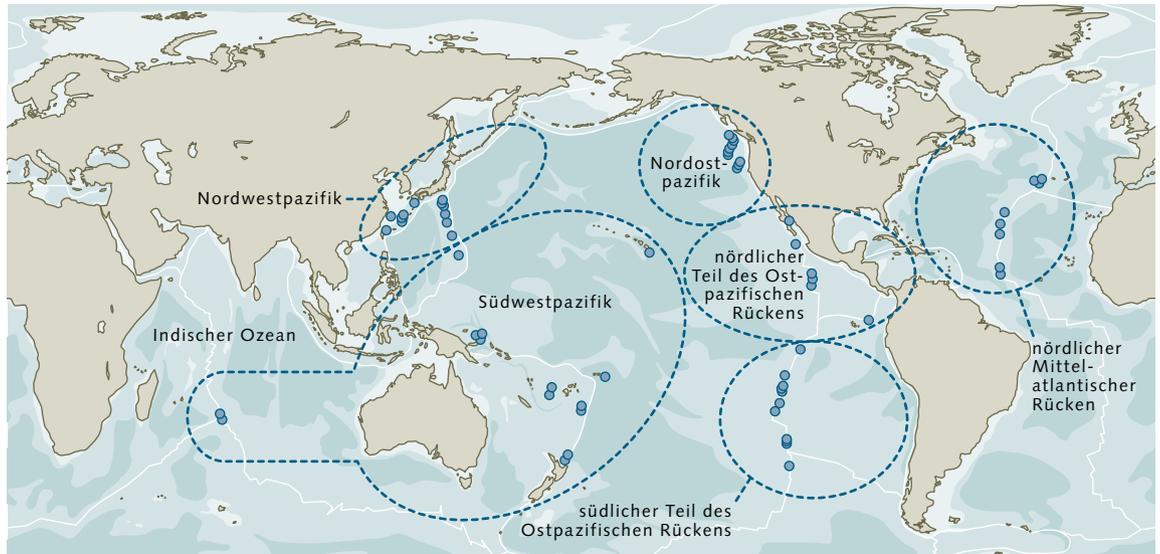
Eine besondere Form von Sulfidablagerungen sind die sulfidreichen Sedimente am Grund des Roten Meeres. Hier liegen die Sulfide nicht in fester Form, sondern als dickflüssiger, metallhaltiger Schlamm vor. Auch im Roten Meer ist die Ursache für die Sulfidbildung magmatische Aktivität im Untergrund. So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

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



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

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



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

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

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

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

Bevor der Bergbau beginnt ...

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

Der Meeresbergbau – kein Goldrausch, aber eine Option

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

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

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

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

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

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

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

Quellenverzeichnis

Kapitel 1 – Öl und Gas aus dem Meer

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

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

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

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

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

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

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

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

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

International Energy Agency, 2012. World Energy Outlook 2012.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

www.itopf.com/

www.ogp.org.uk/

Kapitel 2 – Tagebau am Meeresgrund

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

www.bir.org/

www.boem.gov/MarineMineralsProgram/

www.deepseaminingoutofourdepth.org/

www.ices.dk

www.isa.org.jm/

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

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

Kapitel 3 – Energie aus brennendem Eis

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

Burwicz, E. B., L. Rüpke & K. Wallmann, 2011. Estimation of the global amount of submarine gas hydrates formed via microbial methane formation based on numerical reaction-transport modeling and a novel parameterization of Holocene sedimentation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 16: 4562–4576.

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

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

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

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

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

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

www.mh21japan.gr.jp/english/

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

Kapitel 4 – Umweltschonende Förderung und gerechte Verteilung

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

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

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

Hilpert, H.G., S.-A. Mildner (Hrsg.), 2013. Nationale Alleingänge oder internationale Kooperation? Analyse und Vergleich der Roh-

stoffstrategien der G20-Staaten. *Stiftung Wissenschaft und Politik & Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit*, SWP-Studie.

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

International Oil Pollution Compensation Funds, 2008. *Annual Report – Report on the activities of the International Oil Pollution Compensation Funds 2008*.

Jenisch, U., 2013. Tiefseebergbau – Lizenzvergabe und Umweltschutz, *Natur und Recht*, 35, 12: 841–854.

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

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

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

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

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

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

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

www.iopcfunds.org/

www.isa.org.jm/

Abbildungsverzeichnis

Umschlagabbildung: curraheeshutter/istockphoto.com;
 S. 2: Brian J. Skerry/National Geographic Creative; S. 9 v.o.n.u.:
 Ralph Hinterkeuser; Maurice Tivey, Woods Hole Oceanographic
 Institution/NSF/ROV Jason; NOAA Okeanos Explorer Program/
 Wikimedia Commons; Claudius Diemer, albedo39 Satellitenbild-
 werkstatt, www.albedo39.de; S. 10/11: Ralph Hinterkeuser;
 Abb. 1.1: G. H. Eldridge/U.S. Geological Survey; Abb. 1.2: BP;
 Abb. 1.3: IEA; Abb. 1.4: IEA; Abb. 1.5: BGR (Bundesanstalt für
 Geowissenschaften und Rohstoffe); Abb. 1.6: BGR; Abb. 1.7: Jiri
 Rezac/Greenpeace; Abb. 1.8: BGR; Abb. 1.9: Alessandro Viganò/
 iStockphoto; Abb. 1.10: nach BGR; Abb. 1.11: nach BGR;
 Abb. 1.12: IHS; Abb. 1.13: IHS; Abb. 1.14: IHS; Abb. 1.15: Jürgen
 Willbarth; Abb. 1.16: nach Wirtschaftsverband Erdöl- und Erd-
 gasgewinnung; Abb. 1.17: ESA; Abb. 1.18: nach RWE Dea;
 Abb. 1.19: nach RWE Dea; Abb. 1.20: maribus; Abb. 1.21: nach
 Bryan Christie Design; Abb. 1.22: nach Clauss et al.; Abb. 1.23:
 Rémi Jouan, CC-BY-SA, GNU Free Documentation License, Wiki-
 media Commons; Abb. 1.24: Bettmann/CORBIS; Abb. 1.25: STR
 New/Reuters Abb. 1.26: Victor M. Cadelina, Jr.; Abb. 1.27: nach
 Clauss et al.; Abb. 1.28: think4photop/iStockphoto; Abb. 1.29
 FMC Technologies/statoil ASA; Abb. 1.30: Meteo France Mothy;
 Abb. 1.31: Time & Life Pictures/Getty Images; Abb. 1.32: mari-
 bus; Abb. 1.33: ITOPF, Fernresearch, Lloyds List Intelligence;
 Abb. 1.34: nach The Times Picayune; Abb. 1.35 Gerald Herbert/
 picture alliance/AP Images; Abb. 1.36: picture alliance/dpa Erik
 S. Lesser; Abb. 1.37: Brian Snyder/Reuters; Abb. 1.38: Lee Cela-
 no/Reuters; Abb. 1.39: Dave Martin/picture alliance/AP Photo;
 Abb. 1.40: maribus; Abb. 1.41: ITOPF; Abb. 1.42: Bonn Agree-
 ment; Abb. 1.43: Helcom; Abb. 1.44: maribus; Abb. 1.45:
 Rajavartiolaitos; Abb. 1.46: DREW WHEELAN/picture alliance/
 landov; Abb. 1.47: MATTHEW HINTON/picture alliance/
 landov; S. 54/55: Maurice Tivey, Woods Hole Oceanographic
 Institution/NSF/ROV Jason; Abb. 2.1: picture alliance/CHINA-
 FOTOPRESS/MAXPPP; Abb. 2.2: Hein et al.; Abb. 2.3: BGR
 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe); Abb. 2.4:
 BGR; Abb. 2.5: Wirtgen GmbH; Abb. 2.6: Florian Kopp;
 Abb. 2.7: Javier Marina/agefotostock/Avenue Images; Abb. 2.8:
 Photo courtesy British Marine Aggregate Producers Association;
 Abb. 2.9: Photo courtesy of the Eastern Solent Coastal Partner-
 ship, www.escp.org.uk; Abb. 2.10: Charles D. Winters/Nature-
 Source/Agentur Focus; Abb. 2.11: Hein et al; Abb. 2.12: nach
 Hein et al; Abb. 2.13: BGR; Abb. 2.14: nach Koschinsky, Jacobs
 University, Bremen; Abb. 2.15: Hein & Petersen; Abb. 2.16: nach
 Aker Wirth; Abb. 2.17: BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaf-
 ten und Rohstoffe); Abb. 2.18: nach Hein; Abb. 2.19: nach Hein
 et al.; Abb. 2.20: Hein; Abb. 2.21: maribus; Abb. 2.22:

JAMSTEC; Abb. 2.23: IFE, URI-IAO, UW, Lost City Science Par-
 ty; NOAA/OAR/OER; Abb. 2.24: BGR; Abb. 2.25: Hannington;
 Abb. 2.26: maribus/Sven Petersen; Abb. 2.27: Geomar;
 Abb. 2.28: maribus; Abb. 2.29: Geomar/picture alliance/dpa;
 Abb. 2.30: nach Hein & Petersen; Abb. 2.31: MARUM – Zentrum
 für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen;
 Abb. 2.32: Mike Smith Photography/Nautilus Minerals; S.
 96/97: NOAA Okeanos Explorer Program/Wikimedia Com-
 mons; Abb. 2.33: maribus; Abb. 2.34: nach Bachraty et al.;
 Abb. 3.1: Dietmar Gust, Berlin; Abb. 3.2: nach US Department of
 Energy; Abb. 3.3: Geomar; Abb. 3.4: maribus; Abb. 3.5: Eurico
 Zimbres/wikimedia commons; Abb. 3.6: Geomar; Abb. 3.7: IEA;
 Abb. 3.8: maribus; Abb. 3.9: Kyodo/Reuters; Abb. 3.10: Grafik:
 A. Dibiasi für MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissen-
 schaften, Universität Bremen; Foto: V. Diekamp, MARUM – Zen-
 trum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen;
 Abb. 3.11: Geometrics/Craig Lippus/VP Seismic Division;
 Abb. 3.12: Geomar; Abb. 3.13: Anonymous/picture
 alliance/ASSOCIATED PRESS; Abb. 3.14: NASA Goddard Insti-
 tute for Space Studies; Abb. 3.15: Geomar; Abb. 3.16: nach
 Ruppel; S. 120/121: Claudius Diemer, albedo39 Satellitenbild-
 werkstatt, www.albedo39.de; Abb. 4.1: nach Proelß; Abb. 4.2:
 ARM, Courtesy: U.S. Department of Energy's Atmospheric
 Radiation Measurement Program; Abb. 4.3: ISA (International
 Seabed Authority); Abb. 4.4: maribus; Abb. 4.5: nach ISA;
 Abb. 4.6: nach GRID-Arendal; Abb. 4.7: China Daily China Daily
 Information Corp – CDIC/Reuters; Abb. 4.8: Stringer China/
 Reuters; Abb. 4.9: STR New/Reuters; Abb. 4.10: Issei Kato/
 Reuters; Abb. 4.11: Akintunde Akinleye/Reuters; Abb. 4.12:
 Kim Jae Hwan/AFP/Getty Images; Abb. 4.13: Columbia Basin
 Institute of Regional History; S. 146: Brian J. Skerry/National
 Geographic Creativ

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

Partner

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

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

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

Danksagung

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

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

Nikolaus Gelpke

Geschäftsführer maribus gGmbH

Impressum

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

ISBN 978-3-86648-220-3

Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com

