

Tiefseebergbau – Ökologische und sozioökonomische Auswirkungen

Carsten Rühlemann, Thomas Kuhn, Annemiek Vink

Für die Umsetzung der Energiewende sowie zahlreiche moderne elektronische Hightech-Produkte benötigt man Metalle wie Kupfer, Nickel, Kobalt, Seltene Erden, Indium, Lithium oder Tellur. Diese mineralischen Rohstoffe werden heute ausschließlich an Land gewonnen. Um den global wachsenden Rohstoffbedarf zu decken, wendet sich das Interesse auch verstärkt den Vorkommen in der Tiefsee zu. Manganknollen, kobaltreiche Eisen-Mangankrusten und Massivsulfide aus ein bis fünf Kilometer Wassertiefe gelten als potenzielle Rohstoffquellen der Zukunft. Deutschland hat als führendes Industrieland einen hohen Rohstoffbedarf. Insbesondere im Hinblick auf Metallrohstoffe ist die Industrie jedoch vollständig von Importen aus Drittländern abhängig. Daher ist es nur folgerichtig, dass sich Deutschland aktiv an der Erkundung dieser marinen Erzvorkommen in zwei Lizenzgebieten im Ostpazifik und im südwestlichen Indik beteiligt. Die Explorationsarbeiten können einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Rohstoffversorgung unseres Landes leisten. Für die deutsche Industrie bieten sie außerdem die Chance, mit ihren technisch hochwertigen Technologien internationale Maßstäbe zu setzen bei der umweltverträglichen Gewinnung mariner Rohstoffe und dem Umweltmonitoring der Abbaugebiete. Carsten Rühlemann, Thomas Kuhn und Annemiek Vink informieren im vorliegenden Beitrag über die Rohstoffarten der Tiefsee und ihre Exploration, die wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die sozialen Folgen eines möglichen zukünftigen Abbaus. Außerdem erläutern sie die potenziellen Auswirkungen eines Eingriffs in das Ökosystem der Tiefsee. ■

Mineralische Rohstoffe der Tiefsee

Die unter dem Begriff „marine mineralische Rohstoffe“ zusammengefassten Erzvorkommen in der Tiefsee, also den Ozeanbereichen unterhalb von 1.000 Meter Wassertiefe, umfassen drei verschiedene Arten: Manganknollen, kobaltreiche Eisen-Mangankrusten und Massivsulfide. Alle drei Rohstoffe kommen sowohl innerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ; 200 Seemeilen-Zone) von Küstenstaaten als auch im Ozean außerhalb staatlicher Hoheitsgebiete, in der sogenannten Hohen See, vor. Manganknollen sind schwarzbraune, rundliche und meist zwiebelschalenartig aufgebaute Konkretionen mit Durchmesser zwischen einem und 15 Zentimeter (vgl. *Abbildung 1*). Sie bilden sich vor allem in den sedimentbedeckten Tiefseeebenen der Ozeane in 4.000 bis 6.000 Meter Wassertiefe durch die Ausfällung von Mangan- und Eisenoxiden sowie zahlreichen Neben- und Spurenmetallen aus dem Meerwasser und dem Porenwasser des Sediments.

Die Knollen liegen lose auf dem Meeresboden, ihr Wachstum beträgt zwischen zwei und 100 Millimeter pro Millionen Jahre. Das größte und wirtschaftlich wichtigste Vorkommen mariner Rohstoffe befindet sich im sogenannten Manganknollengürtel der Clarion-Clipperton-Bruchzone (CCZ) des äquatornahen Nordpazifiks zwischen Hawaii und Mexiko (vgl. *Abbildung 2*).

Weitere bedeutende Vorkommen liegen im Perubecken des Südostpazifiks und im zentralen Indischen Ozean. Alle drei genannten Regionen befinden sich in internationalen Gewässern. Der pazifische Manganknollengürtel ist mit knapp fünf Millionen Quadratkilometern etwas größer als die Gesamtfläche aller Länder der Europäischen Union einschließlich Großbritannien (4,4 Mio. km²). Hier sind gebietsweise bis zu 60 Prozent des Meeresbodens mit Manganknollen bedeckt, und die Belegungsdichte in diesen besonders knollenreichen Regionen liegt zwischen 15 und mehr als 30 Kilogramm Nassgewicht pro Quadratmeter (entspricht zehn bis 20 Kilogramm Trockenmasse). Wirtschaftlich interessant sind die Knollen in dieser Region vor allem wegen ihrer vergleichsweise hohen Gehalte an Nickel (1,4 Gewichtsprozent), Kupfer (1,1%) und Kobalt (0,2%), die unter anderem für die Elektro- und Kommunikationsindustrie sowie die Stahlveredelung benötigt werden. Weitere Wertanteile bilden der hohe Mangangehalt von etwa 30 Prozent sowie erhöhte Gehalte der Spurenmetalle Titan, Molybdän und Lithium. Die Gesamtmenge der Knollen im Manganknollengürtel wird auf 25 bis 40 Milliarden Tonnen Nassgewicht geschätzt (International Seabed Authority 2010). Ein weiteres bedeutendes und recht gut untersuchtes Vorkommen von ca. zwölf Milliarden Tonnen Knollen befindet sich in der AWZ der Cookinseln im zentralen Südpazifik. Diese Knollen enthalten im Vergleich zu denen der CCZ höhere Gehalte an Kobalt (0,4 Gewichtsprozent) und Seltene Erden (0,17%), jedoch geringere Gehalte an Nickel (0,38%), Kupfer (0,23%) und Mangan (16%) (Kuhn et al. 2017).

Kobaltreiche Eisen-Mangankrusten sind harte Überzüge aus Eisen- und Manganoxiden (vgl. *Abbildung 3*), die sich auf den Hängen untermeerischer Vulkane (Seamounts) abscheiden. Diese Seamounts ragen meist mehrere 1.000 Meter über die Tiefseeebenen auf. Über viele Millionen Jahre bleiben diese Hochgebiete durch Meeresströmungen frei von absinkenden Partikeln, sodass die Eisen-Mangankrusten mit einer Rate von einem bis fünf Millimeter pro Millionen Jahre wachsen können (Hein et al. 2013).

In den Krusten sind verschiedene Metalle angereichert, die in Hochtechnologieprodukten verarbeitet werden. Hierzu gehören Kobalt, Titan, Molybdän, Zirkon, Tellur, Wismut, Niob, Wolfram, die Seltene Erden sowie Platin. Neben Kobalt wird der Gewinnung von Tellur aus den Eisen-Mangankrusten das größte wirtschaftliche Potenzial beigemessen. Kobalt wird im Rahmen neuer Technologien vor allem in Batterien von Hybrid- und Elektroautos benö-

tigt, Tellur wird für Cadmium-Tellur-Legierungen in der Dünnschichtphotovoltaik und für Wismut-Tellur-Legierungen in Computerchips eingesetzt. Etwa 66 Prozent der heute bekannten potenziellen marinen Lagerstätten befinden sich im Pazifik, rund 23 Prozent im Atlantik und nur elf Prozent im Indik. Als wirtschaftlich interessant werden Vorkommen in Wassertiefen zwischen 800 und 2.500 Meter angesehen. Im Gegensatz zu den Manganknollen befinden sich nur rund die Hälfte der Mangankrustenvorkommen in internationalen Gewässern und die andere Hälfte

innerhalb der AWZ verschiedener Staaten. Bei Schichtdicken von meist drei bis sechs Zentimeter und maximal 26 Zentimeter erreicht die lokale Bedeckung mit Krusten Werte von 60 bis 120 Kilogramm pro Quadratmeter. Die Gesamtmenge an trockener Erzsubstanz weltweit wird auf 40 Milliarden Tonnen geschätzt, von der etwa die Hälfte

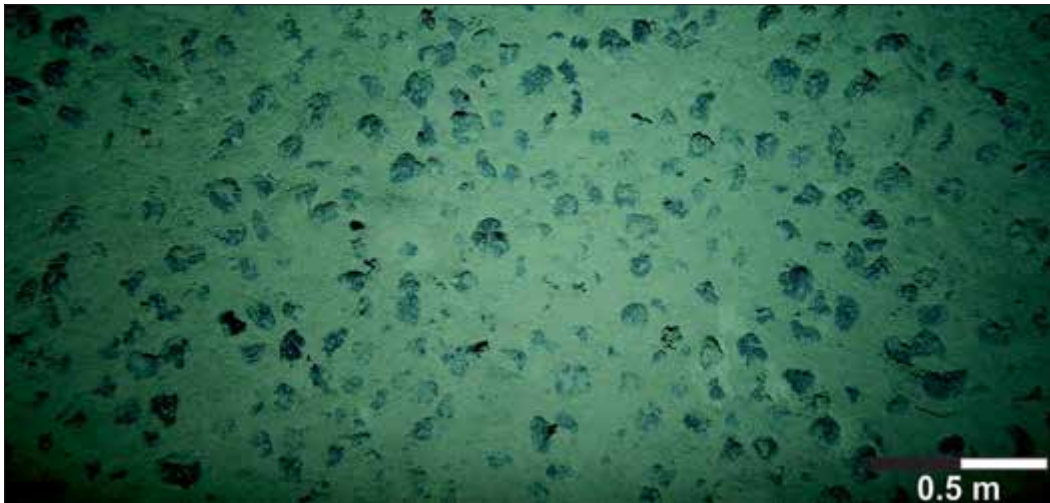


Abbildung 1: Meeresboden im deutschen Lizenzgebiet im Pazifik mit dichter Belegung von Manganknollen.

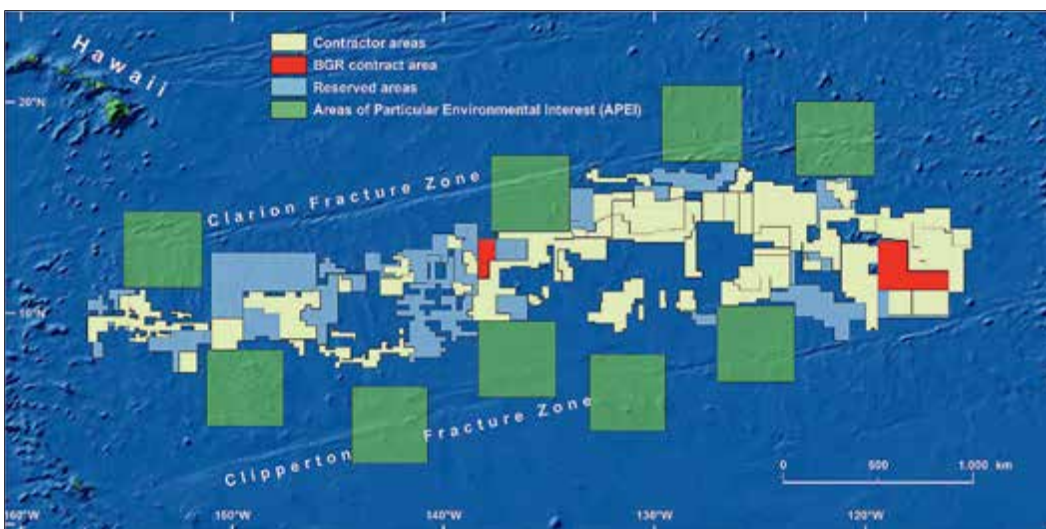


Abbildung 2: Karte des Manganknollengürtels zwischen den Clarion- und Clipperton-Bruchzonen im Ostpazifik. In Rot ist das deutsche Lizenzgebiet dargestellt. Die gelben Flächen sind Lizenzgebiete anderer Kontraktoren und die grünen Flächen markieren die Schutzgebiete.

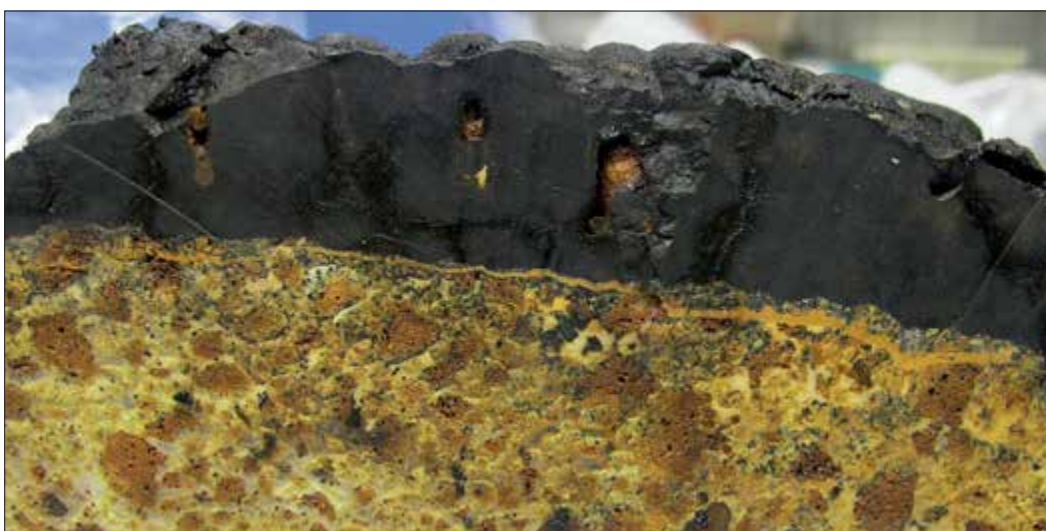


Abbildung 3: Schwarze, 5–7 cm dicke kobaltreiche Eisen-Mangankruste auf verwittertem Vulkangestein von der Louisville-Seebergkette im Südwestpazifik.



Abbildung 4:
Inaktive Metallsulfidschlote
mit Seeanemonen aus dem
deutschen Lizenzgebiet im
Indischen Ozean.

als potenziell gewinnungsfähig angesehen wird. Allerdings sind bis heute weniger als zehn Prozent dieser Vorkommen detailliert untersucht worden, sodass die Abschätzung der Stoffmengen nur eine grobe Näherung darstellt.

Massivsulfide sind Ausfällungsprodukte heißer hydrothermaler Lösungen infolge der Vermischung mit kaltem Meerwasser. Sie sind an tektonische Schwächezonen der ozeanischen Kruste gebunden. Dazu zählen insbesondere die mittelozeanischen Rücken sowie Randmeere und Inselbögen, die beim Abtauchen einer ozeanischen Platte unter eine andere tektonische Platte entstehen. Die sulfidischen Erzvorkommen am Meeresboden werden durch das Zirkulieren von Meerwasser durch die oberen ca. drei Kilometer der ozeanischen Kruste gebildet. Dabei wird das Wasser auf mehrere 100° Celsius aufgeheizt und zu einem aggressiven Fluid, das Metalle aus den vulkanischen Gesteinen laugt (Hannigton et al. 1995). Spektakuläre Erscheinungen wie „Black Smoker“ kennzeichnen die heutigen hydrothermal aktiven Zonen am Meeresboden in Wassertiefen zwischen 1.500 und 3.000 Meter. Aus den Hochtemperaturlösungen fallen Metall-Schwefelverbindungen aus (vgl. *Abbildung 4*), die lokale Lagerstätten von einigen hundert Metern Durchmesser und einigen zehner Metern Mächtigkeit am und im Meeresboden bilden können. Von wirtschaftlichem Interesse sind neben den hohen Buntmetallgehalten (Kupfer, Zink und Blei) besonders die Edelmetalle Gold und Silber sowie Spurenmetalle wie Indium, Tellur, Germanium, Wismut, Kobalt und Selen. Zurzeit sind rund 300 aktive Hochtemperaturaustritte mit Bildung von Metallsulfid-Anreicherungen nachgewiesen und weitere 360 werden aufgrund von Indizien vermutet (www.interridge.org). Hingegen sind weltweit bislang nur rund 60 inaktive Vorkommen bekannt. Und nur diese kommen für einen möglichen Abbau in Frage.

Die Internationale Meeresbodenbehörde

Der Meeresboden jenseits der Grenzen nationaler Zuständigkeiten umfasst 42 Prozent der Erdoberfläche und gilt

nach Artikel 136 des Seerechtsübereinkommens (SRÜ) der Vereinten Nationen als „Gemeinsames Erbe der Menschheit“. Die Internationale Meeresbodenbehörde (IMB) in Kingston, Jamaika, die dieses Erbe verwaltet, ist eine eigenständige internationale Organisation mit derzeit 167 Mitgliedsländern und der EU. Sie wurde 1994 im Rahmen des SRÜ geschaffen. Die IMB reguliert und überwacht alle Aktivitäten zur wirtschaftlichen Nutzung des internationalen Meeresbodens und dessen Untergrundes. Die IMB hat darüber hinaus die Aufgabe, den im Seerecht verankerten Interessensausgleich zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern voranzubringen. Da bisher noch kein Tiefseebergbau stattfindet, besteht die zentrale Aufgabe der Behörde zurzeit darin, neben der Vergabe und Überwachung von Explorationslizenzen die Regeln zum künftigen Abbau der mineralischen Rohstoffe in der Tiefsee zu erarbeiten.

Die Rechtsgrundlagen zur Prospektion und Erkundung der drei Rohstofftypen der Tiefsee sind in den „Exploration Regulations“ der IMB zusammengefasst, die im Jahr 2000 für Manganknollen, in 2010 für Massivsulfide und in 2012 für Mangankrusten verabschiedet wurden und regelmäßig aktualisiert werden. Einen Antrag auf eine Explorationslizenz können sowohl staatliche als auch private Unternehmen gegen eine Gebühr von 500.000 US-Dollar stellen. Die Lizenzanträge müssen von ihrem Heimatstaat, dem sogenannten „Sponsoring State“ befürwortet werden. Der befürwortende Staat, der ein geeignetes Meeresbergbaurecht in Kraft gesetzt haben muss, prüft die Einhaltung der Eignungsanforderungen sowie die finanzielle und technische Leistungsfähigkeit des Unternehmens. Er ist zur aktiven Überwachung verpflichtet und haftet für diese Tätigkeit. In Deutschland ist das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie in Hannover zuständig und unterliegt hierfür der Fach- und Rechtsaufsicht des Bundes.

Seit 2002 hat die IMB insgesamt 30 Lizenzen zur Erkundung des Meeresbodens nach mineralischen Rohstoffen mit einer Laufzeit von 15 Jahren vergeben, 18 für die Exploration von Manganknollen in Gebieten von jeweils etwa 75.000 Quadratkilometern Fläche, fünf für die Erkundung von Mangankrusten (je 3.000 km²) und sieben für die Ex-

ploration von Massivsulfiden (je 10.000 km²). Die Lizenznehmer kommen aus 20 verschiedenen Staaten, davon zwölf aus Asien, 13 aus West- und Osteuropa, vier von pazifischen Inselstaaten und einer aus Südamerika. Jede Explorationslizenz hat eine Laufzeit von 15 Jahren mit der Möglichkeit, die Lizenz mehrfach um jeweils fünf Jahre zu verlängern. Sie gewährt zugleich ein Vorrecht auf späteren Abbau und berechtigt auch zum Testen von Technik, beispielsweise für den Abbau. Als Lizenznehmer treten sowohl staatliche Institutionen wie auch private Unternehmen auf.

Deutsche Lizenzgebiete im Pazifik und Indik

Um die zukünftige Versorgung der deutschen Wirtschaft mit strategisch wichtigen Metallen wie Nickel, Kupfer, Kobalt und Mangan zu gewährleisten, hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Auftrag der Bundesregierung mit der IMB Verträge zur Exploration von zwei Gebieten der Hohen See geschlossen. Seit Juli 2006 erkundet die BGR im Rahmen von bisher neun Expeditionen ein Lizenzgebiet für Manganknollen im Pazifik, das aus zwei Teilgebieten besteht, eines im östlichen Teil der CCZ und ein weiteres im zentralen Bereich (vgl. Abbildung 2). Die Arbeiten umfassten neben der Kartierung der Meeresbodentopographie mittels Fächerecholot und der Abschätzung der Manganknollenvorräte auch Untersuchungen zur Biodiversität und Meeresumwelt, um die Auswirkungen eines möglichen zukünftigen Abbaus beurteilen zu können. Der östliche Teil des Lizenzgebietes enthält auf einer Fläche von 60.000 Quadratkilometer rund 780 Millionen Tonnen Nassgewicht Manganknollen. Aber nur etwa 20 Prozent dieser Fläche kommen für einen Abbau in Frage, da dort sowohl der Meeresboden flach genug als auch die Belegungsdichte mit Manganknollen (in Kilogramm pro Quadratmeter) hoch genug wäre für den Einsatz eines Abbaugerätes. Für drei wirtschaftlich besonders vielversprechende Areale mit einer Gesamtgröße von 4200 Quadratkilometern hat die BGR die Vorkommen detailliert untersucht. Die Gesamtmenge der Manganknollen in diesen drei Gebieten beträgt 80 Millionen Tonnen Nassgewicht (56 Millionen Tonnen Trockengewicht). Darin enthalten sind insgesamt 18,5 Millionen Tonnen Mangan, Nickel, Kupfer und Kobalt. Bei einer angenommenen Fördermenge von drei Millionen Tonnen Nassgewicht pro Jahr würde dieses Knollenvorkommen für rund 25 Jahre Tiefseebergbau reichen. Die daraus gewinnbare Metallmenge entspricht für Nickel rund 50 Prozent der deutschen Nettoimporte, 80 Prozent für Kobalt und 300 Prozent für Mangan, jedoch nur sechs Prozent für Kupfer (vgl. Tab. 1).

Im Mai 2015 hat die BGR einen zweiten Lizenzvertrag unterzeichnet für die Erkundung von Sulfidvorkommen im südwestlichen Indischen Ozean. Die Explorationslizenz umfasst eine Fläche von 10.000 Quadratkilometern, aufgeteilt in 100 Explorationsblöcke mit einer Größe von jeweils zehn mal zehn Kilometer, die in zwölf Clustern gebündelt sind. Die BGR hat während ihrer bisherigen Explorationsarbeiten fünf polymetallische Sulfidareale mit sieben aktiven Hydrothermalfeldern und zehn inaktiven Sulfidvorkommen identifiziert und diese Vorkommen detailliert kartiert. Die Sulfiderze haben hohe Kupfer- und Zinkgehalte, zum Teil deutlich erhöhte Konzentrationen von Gold und Silber sowie signifikante Anreicherungen von Spurenmetallen wie Selen, Antimon und Gallium. Die laterale Ausdehnung der Sulfidfelder am Meeresboden liegt zwischen 130 mal 220 Meter und 600 mal 1200 Meter. Zur Berechnung der Tonnagen werden in den kommenden Jahren Bohrungen durchgeführt, um auch die Mächtigkeit der einzelnen Erzkörper zu bestimmen.

Bedarf an Metallrohstoffen

Die weltweite Nachfrage nach Rohstoffen steigt. Sie wird einerseits getrieben durch das weltweite Bevölkerungswachstum, andererseits durch die Entwicklung neuer Technologien wie dem Ausbau der Elektromobilität, der Energiewende und der zunehmenden Digitalisierung aller Lebensbereiche. Insbesondere Rohstoffe wie Kupfer, Nickel und Kobalt, die auch in der Tiefsee zu finden sind, werden durch den weltweiten Ausbau der E-Mobilität einen starken Nachfrageimpuls erfahren. So benötigt die 75-Kilowattstunde-Batterie eines E-Autos 85 Kilogramm Kupfer, 56 Kilogramm Nickel, sieben Kilogramm Kobalt und sieben Kilogramm Mangan (Paulikas/Katona 2019). Hochgerechnet auf eine Millionen E-Autos, wie von der Bundesregierung für 2030 avisiert, ergibt sich ein Bedarf von 85.000 Tonnen Kupfer, 56.000 Tonnen Nickel, 7.000 Tonnen Kobalt und 7.000 Tonnen Mangan allein für die E-Mobilität. Für Kupfer wird erwartet, dass neben der E-Mobilität auch die weltweit zunehmende Elektrifizierung und der damit verbundene Netzausbau einen Nachfrageimpuls auslösen werden.

Um dem Rohstoffbedarf nachzukommen, müssen die bestehenden Bergwerkskapazitäten erhöht oder zusätzliche Bergwerke eröffnet werden. Beides ist an Land jedoch mit einer Intensivierung der Umweltauswirkungen und sozialen

Tabelle 1: Gewinnbare Metallmengen

Metall	Mögliche Produktion aus Mn-Knollen (t) ^a	Globale Bergwerksproduktion (t) ^b	Anteil (%) ^c	Nettoimporte nach Deutschland (t) ^b	Anteil (%) ^c
Kupfer	22.000	21.000.000	0,1	373.000	6
Nickel	28.000	2.300.00	1,2	55.000	51
Kobalt	3.200	140.000	2,3	4.000	80
Mangan	600.000	18.000.000	3,3	200.000	300

a) Metallinhalt einer angenommenen Jahresproduktion von 3 Mio. t Knollen Nassgewicht inklusive Verlust bei der metallurgischen Verarbeitung; b) in Tonnen Metallinhalt für 2018 (Daten von der Deutschen Rohstoffagentur an der BGR, DERA; für Mn vom USGS); c) prozentuale Anteile der möglichen Metallgewinnung aus Manganknollen am Nettoimport nach Deutschland.

Problemen verbunden, zum Beispiel der Abholzung von Regenwäldern, Vernichtung von Ackerflächen, dem Verbrauch großer Mengen Wasser dem Eintrag von Schadstoffen und Schwermetallen, die beim Abbau freigelegt werden, sowie der zwangsweisen Umsiedlung von Bewohnern der prospektiven Gebiete. Außerdem ist seit einigen Jahren eine Zunahme von Angebotskonzentrationen auf den Rohstoffmärkten zu beobachten. Bei vielen Metallen stammt der Großteil der Produktion aus nur einem Land, teilweise aus Staaten mit erhöhtem Risiko aufgrund politischer Instabilität, wie im Falle von Kobalt aus der Demokratischen Republik Kongo. Auch unter diesem Aspekt können, neben einem zukünftig verbesserten und intensivierten Recycling, Rohstoffe aus der Tiefsee eine sinnvolle Ergänzung darstellen, da sie internationalem Recht und damit der Kontrolle der Weltgemeinschaft unterliegen, auch im Hinblick auf soziale Aspekte und Umweltaspekte. Zudem bieten Manganknollen den Vorteil, dass die Metalle Mangan, Nickel, Kupfer und Kobalt hier in einem Erz vereint sind, während sie an Land aus mindestens drei getrennten Lagerstätten abgebaut werden müssen.

Abbautechnik

Um ausreichend hohe Fördermengen an Manganknollen zu erzielen, gehen aktuelle Konzepte für Abbausysteme von Kollektorsystemen aus, bei denen raupenähnliche Fahrzeuge die Manganknollen am Meeresboden mechanisch oder hydraulisch aufnehmen (vgl. *Abbildung 5*). Die Knollen werden auf dem Kollektor von anhaftendem Sediment gereinigt, zerkleinert und an ein vertikales Fördersystem übergeben. Je nach Konzept werden die Knollen dann über ein Luftheberverfahren oder mittels Dickstoffpumpen zur Förderplattform an der Wasseroberfläche gefördert. Dort werden sie entwässert und für den Transport an Land auf Bulker-Schiffe verladen. Die zu erwartenden technischen Herausforderungen liegen vor allem im zuverlässigen Betrieb in vier bis sechs Kilometer Wassertiefe bei Drücken von 400 bis 600 bar und Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt über einen langen Zeitraum bei möglichst geringem Wartungsaufwand. Auch wenn die prinzipiellen technischen Komponenten in der Offshore-Öl- und Gasförderung sowie im küstennahen Abbau von Kies, Sanden und Seifenlagerstätten (Diamant, Rutil) bereits eingesetzt werden, gibt es bisher keine Erfahrungen beim Einsatz dieser Technik in der Tiefsee. Das staatliche koreanische Forschungsinstitut KIOST hat den Manganknollen-Kollektor „MineRo“ mit einem hydraulischen Aufnahmesystem im Maßstab 1:5 in Bezug auf die finale Abbaukapazität und ein vertikales Fördersystem entwickelt. MineRo wurde in Wassertiefen von 1.400 Meter und das Fördersystem in 1.200 Meter getestet. In Europa treibt das belgische Unternehmen DEME-GSR die Entwicklung der Abbautechnologie konsequent voran und plant einen industriellen Abbau in seinem Lizenzgebiet in der CCZ ab 2028. Im September 2018 hat DEME-GSR seinen Kollektorprototyp „Patania II“ im Maßstab 1:4 vorgestellt, dessen Fahrwerk bereits 2017 erfolgreich in 4.400 Meter Wassertiefe getestet wurde. Dieser Prototyp mit einem hydraulischen Aufnahmesystem für Knollen soll in 2020 in der gleichen Wassertiefe eingesetzt werden, nachdem ein erster Test in 2019 aufgrund technischer Probleme mit dem Verbindungskabel zum Schiff abgebrochen werden musste.

Im Gegensatz zu den Manganknollen, die lose auf den un-
verfestigten, ebenen Tiefseesedimenten liegen, sind die Eisen-Mangankrusten fest mit dem Gesteinsuntergrund verwachsen. Eine technische Herausforderung besteht daher in der Trennung von Krusten und Substrat während des Abbaus. Hinzu kommt, dass die Krusten auf den Hängen von Seamounts mit erheblicher Hangneigung und ausgeprägter Mikrotopographie auftreten. Auch die Messung der Krustendicke am Meeresboden zur effektiven Bestimmung des Lagerstätteninhaltes ist bisher ein ungelöstes technisches Problem. Diese Bedingungen erfordern technische Ansätze für die Exploration und Gewinnung von Eisen-Mangankrusten, die sich deutlich von jenen der Manganknollen unterscheiden. Bei der Exploration der Krustendicke wird der Einsatz von Gammastrahlern sowie Ultraschall diskutiert. Für das Ablösen der Krusten vom Substrat sehen derzeitige Konzepte den Einsatz mechanischer Verfahren (Fräsen/Schneiden) sowie Hochdruckwasserstrahlverfahren oder eine Kombination von beiden vor.

Für den Abbau von polymetallischen Sulfiden in den Hoheitsgewässern von Papua-Neuguinea in 1.400 Meter Wassertiefe hat die Firma Nautilus Minerals ein Abbaukonzept mit ferngesteuerten Raupenfahrzeugen mit rotierenden Rollenmeißeln entwickelt, wie sie beispielsweise weltweit im Steinkohleabbau Anwendung finden. Die bereits fertig gebauten Fahrzeuge wurden bislang noch nicht eingesetzt, da die Finanzierung des Abbaus nicht sichergestellt werden konnte. Ein ähnliches Konzept wie Nautilus Minerals verfolgt die Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC), die 2017 erfolgreich einen Abbauersuch von Sulfiden in der eigenen AWZ durchgeführt hat. JOGMEC strebt nach einer weiteren mehrjährigen Entwicklungs- und Erprobungsphase eine Jahresproduktion von 1,3 Millionen Tonnen Sulfiderz an (Okamoto et al. 2018).

Ein Konsortium der deutschen Unternehmen Harren & Partner, Combi Lift und Bauer Bohrtechnik bevorzugt eine För-



derung der Sulfide mittels Bohrtechnik und modifiziert dazu derzeit Schlitzwandfräsen, wie sie im Pipeline-, Hafen- und Kanalbau verwendet werden, für den Einsatz in der Tiefsee. Im Vergleich zu den obengenannten Raupenfahrzeugen wären die Umweltauswirkungen vermutlich wesentlich geringer, weil eine Freisetzung von Bohrklein durch kontinuierliches Absaugen weitestgehend vermieden werden kann und zudem kaum Abraam am Meeresboden anfällt. Das Konsortium plant in den kommenden Jahren einen ersten Test im deutschen Lizenzgebiet im Indischen Ozean.

Metallurgische Verarbeitung

Zur Wertschöpfung beim Abbau mariner mineralischer Rohstoffe gehören neben der Gewinnung und dem Transport des Rohstoffs vom Meeresboden auch die Extraktion der Metalle und die Herstellung verkaufsfähiger Zwischenprodukte. Ohne ein geeignetes metallurgisches Verfahren zur Verwertung wäre die Förderung der Manganknollen obsolet. Im Gegensatz zu den marinen Massivsulfiden gibt es jedoch weder bei den Manganknollen noch bei den Mangankrusten ein industriell etabliertes metallurgisches Extraktionsverfahren. Deshalb hat die BGR gemeinsam mit der RWTH Aachen ein „Zero-Waste“-Konzept zur Verhütung entwickelt, das eine vollständige Nutzung der Knollen beinhaltet. Dabei entstehen neben den Metallen Kobalt, Kupfer, Nickel und Molybdän auch ein Ferromangan und ein Silicomangan-Produkt, die in der Stahlherstellung verwendet werden können und ein Kalzium-Silizium-Mineralprodukt für die Bauindustrie. Dieses Konzept ist weltweit einmalig und wurde bereits im erweiterten Labormaßstab erfolgreich getestet. Zurzeit wird das Verfahren in den industriellen Maßstab überführt, um die generelle Machbarkeit einer nahezu rückstandsfreien metallurgischen Verarbeitung nachzuweisen. Dieser Schritt ist neben der technologischen Realisierung auch für die Bewertung der Wirt-

schaftlichkeit eines zukünftigen Manganknollenbergbaus und die technische Auslegung eines Aufbereitungswerkes unerlässlich.

Wirtschaftlichkeit eines Tiefseebergbaus

Ein zukünftiger Abbau von Manganknollen wird als wirtschaftlich rentabel angesehen, wenn die Knollen mit mindestens zehn Kilogramm Trockenmasse pro Quadratmeter auftreten und eine Gewinnung von ca. zwei Millionen Tonnen Trockenmasse (drei Millionen Tonnen Nassgewicht) pro Jahr über einen Zeitraum von 20 Jahren möglich ist. Um diese Mengen zu gewährleisten, müssen pro Jahr Knollen von einer Fläche von ca. 200 Quadratkilometer abgebaut werden. Die Wirtschaftlichkeit von Tiefseebergbau wird durch die erzielbaren Gewinne, also vor allem die Höhe der Metallpreise gegenüber den Kosten für Abbau, Transport und metallurgische Verarbeitung bestimmt. Weiterhin sind Gebühren und Abgaben der Lizenznehmer an die IMB zu berücksichtigen. Die Abschätzung einiger dieser Kosten ist im Detail mit hohen Unsicherheiten verbunden oder sie sind zurzeit sogar noch gänzlich unbekannt, wie beispielsweise die Höhe der Abgaben. Metallpreise unterliegen einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Einige davon wirken kurzfristig und vorübergehend auf die Rohstoffmärkte, wie etwa Spekulationsblasen, Naturkatastrophen, politische Umwälzungen oder bewaffnete Konflikte. Andere wiederum stellen längerfristige Entwicklungen dar. Dazu gehören etwa die wachsende Weltbevölkerung und der wirtschaftliche Aufholprozess der Schwellen- und Entwicklungsländer sowie technologische Veränderungen in Abbau und Verwendung der Metalle. Und obwohl die Kosten für die Aufbereitung und metallurgische Verarbeitung der Manganknollen voraussichtlich die Hälfte bis zwei Drittel der gesamten Investitions- und Betriebskosten eines Tiefseebergbauprojekts umfassen, können auch sie nur mit großer Unsicherheit abgeschätzt werden, da es zurzeit noch keinen Verarbeitungsprozess im industriellen Maßstab gibt, der eine genauere Prognose erlauben würde. Zwei aktuelle Studien von Ramboll-IMS gemeinsam mit dem Hamburger Weltwirtschaftsinstitut für das Bundeswirtschaftsministerium sowie vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) für die IMB führen eine detaillierte Analyse der oben genannten Faktoren durch. Die Studien rechnen mit Investitionskosten von rund anderthalb Milliarden US-Dollar, eine Summe, die auch für die Erschließung landgebundener Vorkommen anzusetzen ist. Hinsichtlich der jährlichen Betriebskosten nimmt das MIT 160 Millionen US-Dollar an und Ramboll/HWW etwa 400 Millionen US-Dollar. Beide Studien gehen davon aus, dass Tiefseebergbau zum gegenwärtigen Preisniveau der Metalle noch nicht profitabel wäre. Für die kommenden anderthalb Jahrzehnte (Ramboll/HWW) beziehungsweise vier Jahrzehnte (MIT) erwarten sie jedoch aufgrund eines weiterhin steigenden Weltwirtschaftswachstums und aufgrund technologischer Entwicklungen eine wachsende Nachfrage nach Rohstoffen und eine damit verbundene Zunahme der Rohstoffpreise, insbesondere im Zuge des Übergangs der Nutzung von fossilen Energieträgern zu



Abbildung 5: Prototyp eines selbstfahrenden Kollektors des belgischen Unternehmens DEME-GSR zum Abbau von Manganknollen in der Tiefsee im Testmaßstab. Der Prototyp hat die Abmessungen 10 x 4,7 x 4,5 m (L x B x H) und ein Gewicht von 35 t in Luft. Er soll im Einsatz eine Geschwindigkeit von mindestens 0,5 m pro Sekunde erreichen.

Courtesy of Global Sea Mineral Resources

erneuerbaren Energien. Dies, so die Schlussfolgerung, wird langfristig eine Profitabilität des Tiefseebergbaus ermöglichen.

Potentielle Umweltauswirkungen des Tiefseebergbaus

Für alle drei Rohstofftypen der Tiefsee besteht die Sorge, dass ein zukünftiger Abbau die biologischen Ressourcen und deren Artenvielfalt sowie die Ökosystemdienstleistung der Tiefsee schädigen könnte, deren Schutz im Seerechtsübereinkommen zwar generell gefordert, aber nicht im Detail geregelt ist (Jenisch 2010). Abhängig von der bislang noch nicht im industriellen Maßstab entwickelten Tiefseebergbautechnologie sind schädliche Auswirkungen, die bisher nur ansatzweise erforscht wurden, vor allem auf die Bodenfauna zu erwarten. Kritiker befürchten weiterhin großräumige Auswirkungen eines Unterwasserbergbaus durch die Entwicklung von Trübewolken am Meeresboden und Umweltbeeinträchtigungen durch die Einleitung von Reststoffen sowie die Freisetzung von Schadstoffen aus dem Meeresboden und von den Förderplattformen. Die IMB ist gemäß der Artikel 145 und 209 des Seerechtsübereinkommens einem nachhaltigen marinen Umwelt- und Biodiversitätsschutz verpflichtet. Die Notwendigkeit des Umweltschutzes wird entsprechend in allen Bestimmungen, Richtlinien und Empfehlungen der IMB hervorgehoben. Mögliche Umweltauswirkungen des Abbaus sind nach den mineralischen Rohstofftypen zu unterscheiden.

Auf dem und im Boden der Manganknollen-reichen sedimentbedeckten Tiefseeebenen leben mobile und sessile Tiere verschiedener Größen, von wenige zehntel Millimeter kleinen Fadenwürmern, die den Hauptbestandteil der Biodiversität ausmachen, bis hin zu mehreren Dezimetern großen Seegurken und meterlangen Fischen. Weiterhin leben viele Tiere fest auf den Knollen (z.B. Schwämme und Korallen) oder in Symbiose mit diesen festangewachsenen Tieren. Während die Diversität der Fauna enorm groß ist und etwa der im Regenwald entspricht, ist die Individuendichte der meisten Arten äußerst gering. Deshalb ist bislang trotz umfangreicher internationaler Forschungsprogramme nur ein geringer Anteil der dort lebenden Organismen bekannt, und noch weniger sind wissenschaftlich beschrieben worden (Glover et al. 2015). Da Photosynthese in diesen Tiefen ohne Licht nicht möglich ist, sind die dort lebenden Tiere auf die Zufuhr von Nährstoffen in Form von absinkenden Partikeln aus dem Oberflächenwasser angewiesen. Aufgrund der harschen Umweltbedingungen und des spärlichen Nahrungsangebotes sind Wachstum und Reproduktionszyklen in der Tiefsee sehr langsam.

Für die Manganknollenfelder werden vor allem zwei grundlegende Umweltauswirkungen für die derzeit diskutierte Abbauverfahren erwartet. Einerseits die Entfernung der oberen ca. zehn Zentimeter des Meeresbodens mit der darauf und darin lebenden Fauna im Abbaubereich und andererseits die Aufwirbelung von Sedimentpartikeln und kleingeriebenem Erzmaterial, in erster Linie direkt durch den Kollektor, aber auch durch Rückleitung des Förderwassers vom Schiff in die Tiefsee. Zusätzliche Auswirkungen werden durch Lärm, Vibrationen und Licht des Abbaugeräts und der Förderplattform erwartet. Für den Abbau mit derzeit geplanten Kollektoren wird mit 500 bis 1.000 Tonnen aufgewirbeltem Sediment pro Stunde gerechnet. Da



Manganknollen sind schwarzbraune, rundliche und meist zwiebschalenartig aufgebaute Konkretionen mit Durchmesser zwischen einem und 15 Zentimeter. Sie bilden sich vor allem in den sedimentbedeckten Tiefseeebenen der Ozeane in 4.000 bis 6.000 Meter Wassertiefe durch die Ausfällung von Mangan- und Eisenoxiden sowie zahlreichen Neben- und Spurenmetallen aus dem Meerwasser und dem Porenwasser des Sediments. Ihr Wachstum beträgt zwischen zwei und 100 Millimeter pro Millionen Jahre.

picture alliance/dpa

durch entstehen Trübewolken am Meeresboden, die die natürliche Sedimentationsrate, die nur wenige Millimeter pro tausend Jahre beträgt, drastisch erhöhen, wenn die Partikel sich wieder absetzen. Kleinskalige Experimente im Labor und vor Ort in der Tiefsee sowie umfangreiche Untersuchungen mit numerischen Ozean- und Sedimenttransportmodellen haben gezeigt, dass sich 90 bis 95 Prozent der durch die Kollektoren aufgewirbelten Sedimente im Umkreis von einigen Kilometern zügig wieder absetzen; der Rest wird durch Bodenströmungen außerhalb des Abbaubereichs verdriftet und lagert sich in größerer Entfernung vom Ursprungsort auf dem Meeresboden und seiner Fauna ab (Jankowski/Zielke 2001; Gillard et al. 2019). Die Auswirkungen dieser Trübewolken und Ablagerungen auf die Fauna sind artabhängig und bislang nur unzureichend untersucht. Die in direkter Nachbarschaft zum Abbaubereich auf dem Meeresboden oder den Knollen siedelnden Tiere werden durch die Masse der herabsinkenden Sedimentpartikel bedeckt, aber auch die Lebensfunktionen von Wasserfiltrierenden Lebewesen wie Schwämme, Korallen, manchen Fischarten oder Larven können durch die erhöhte, eventuell mit freigesetzten Schwermetallen belastete Partikelfracht im Wasser beeinflusst werden. Versuche am Meeresboden zur Beeinträchtigung des Ökosystems im experimentellen Maßstab haben gezeigt, dass die Anzahl der Tiere und sogar der Mikroben, die im bzw.



auf dem Meeresboden und den Knollen leben, auch Jahrzehnte nach der Störung noch deutlich verringert ist gegenüber dem ursprünglichen Zustand (Vanreusel et al. 2016). Die Untersuchungen zeigen jedoch auch, dass eine allmähliche Wiederbesiedlung der gestörten Flächen stattfindet und dass sich eine funktionstüchtige Faunengemeinschaft mit annähernd der gleichen Diversität wie zuvor entwickeln kann (Thiel et al. 2005; Jones et al. 2017). Jedoch dauert dieser Prozess mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte, und es ist grundsätzlich mit einer angepassten Artenzusammensetzung und -verteilung zu rechnen, zum Beispiel, weil Organismen, die auf den Knollen leben oder deren Lebensweise durch das Hartsubstrat beeinflusst wird, sich in den gestörten Feldern nicht wieder ansiedeln können. Ob künstliche Hartsubstrate als Ersatz dienen können, wird zurzeit durch ein Langzeitexperiment im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „MiningImpact“ untersucht. Die Erholung der Lebensgemeinschaften in den Abbaugebieten wird in jedem Fall entscheidend von der Distanz zu vergleichbaren ungestörten Flächen abhängen (Thiel et al. 2012).

Bei den Massivsulfiden sind die gegenwärtig diskutierten Abbaufächen mit weniger als einem Quadratkilometer relativ klein. Je nach hydrothermalen Aktivität werden in aktiven und inaktiven Zonen sehr unterschiedliche Lebensgemeinschaften gefunden. Extrem anpassungsfähige, oft endemische, chemosynthetische Organismen mit niedriger Diversität leben an aktiven hydrothermalen Quellen. Demgegenüber besiedeln gewöhnliche Tiefseearten das Hartsubstrat der inaktiven hydrothermalen Austrittsstellen. Lebewesen- und Hartsubstratverlust sowie die Entstehung von möglicherweise toxischen Trübewolken durch Abbau und Rückwassertransport gelten als potentiell schwerwiegendste Umwelteinwirkungen. Aufgrund der im Vergleich zu den Manganknollenfeldern relativ kleinen Abbaufäche sowie durch das hohe Anpassungsvermögen der Lebe-

wesen und die ohnehin stark variierenden natürlichen Umweltbedingungen werden die Umwelteinwirkungen insgesamt jedoch als gering eingeschätzt, zumal ein Abbau aktiver Felder ohnehin nicht vorgesehen ist. Für kobaltreiche Eisen-Mangankrusten würde die Abbaufäche zwar größer sein als beim Abbau der Massivsulfide, aber kleiner als beim Abbau von Manganknollen. Zusätzlich zum Verlust von Lebewesen würde der ins Wasser eingebrachte Rückstand durch den Abbau aufgrund der Morphologie an den Seamounthängen abgleiten und so in größere Wassertiefen gelangen.

Für alle drei mineralischen Rohstoffarten der Tiefsee wird vorausgesetzt, dass eine Beeinträchtigung der Umwelt durch einen möglichen Abbau so gering wie möglich gehalten wird mit Hilfe minimalinvasiver Techniken, die den Richtlinien „Best Available Technology“ (BAT) und „Best Environmental Practice“ (BEP) der Umweltbehörde der Vereinten Nationen (UNEP) entsprechen und durch die Einhaltung höchster Umweltstandards sowie der Erarbeitung eines Umweltmanagementplans (UMP). Eine Schonung der Umwelt kann aus technologischer Sicht erreicht werden durch (a) einen möglichst geringen Druck des Kollektors auf den Meeresboden; (b) eine geringe Eindringtiefe des Knollen-Aufnahmesystems in das Sediment; (c) das Reduzieren der bodennah entstehenden Sedimentwolke durch technische Maßnahmen, die eine schnelle Absetzung der aufgewirbelten feinkörnigen Sedimente bewirken; (d) eine möglichst geringe Transportmenge von Sedimenten und Gesteinsabrieb zur Förderplattform an der Meeresoberfläche, um deren Rückführung zu minimieren; und (e) die bodennahe Rückleitung dieser feinkörnigen Rückstände. Weil die flächenhafte Verteilung der Manganknollen nicht gleichmäßig ist, würden zwischen den wirtschaftlich attraktiven Gebieten große unberührte Zonen verbleiben. Die Wiederbesiedlung der gestörten Flächen könnte dann über diese benachbarten, nicht abgebauten Felder erfolgen. Zum Schutz der Biodiversität hat die IMB im Rahmen ihres „Environmental Management Plan“ (EMP) für der Clarion-Clipperton-Zone neun jeweils 160.000 Quadratkilometer große Meeresschutzgebiete eingerichtet, die zusammen ein Drittel der Gesamtfläche des Manganknollengürtels umfassen (vgl. Abbildung 2) und in denen kein Abbau stattfinden soll. Es ist darüber hinaus geplant, zwei weitere solche Schutzgebiete in der CCZ einzurichten. Weiterhin erörtert die IMB momentan mit verschiedenen Interessengruppen die Einrichtung derartiger EMPs in allen rohstoffreichen Gebieten der Hohen See und die daraus resultierenden Pflichten für Kontraktoren, um verbindliche Regelungen zur sorgsam und adaptiven Raumplanung des Tiefseebergbaus und zum effektiven Schutz der Umwelt auf regionaler Ebene zu schaffen.

Soziale Auswirkungen eines Tiefseebergbaus

Bei einem Tiefseebergbau auf Hoher See sind soziale Auswirkungen vor allem am Ende der Verwertungskette zu erwarten, dort wo die mineralischen Rohstoffe an Land metallurgisch aufbereitet werden und eher indirekt über Einflüsse auf Preisentwicklungen am globalen Metallmarkt.

Einerseits entstehen dort, wo die Aufbereitung stattfindet, Arbeitsplätze, die mit einem allgemeinen Wohlstandszuwachs am Standort einhergehen können, andererseits ist mit möglichen Umweltauswirkungen wie beispielsweise einer Trinkwasserverschmutzung zu rechnen. Da diese Folgen aber nicht spezifisch für den landfernen Tiefseebergbau gelten, sondern gleichermaßen für die Aufbereitung von terrestrischen Rohstoffen, werden sie hier nicht weiter diskutiert.

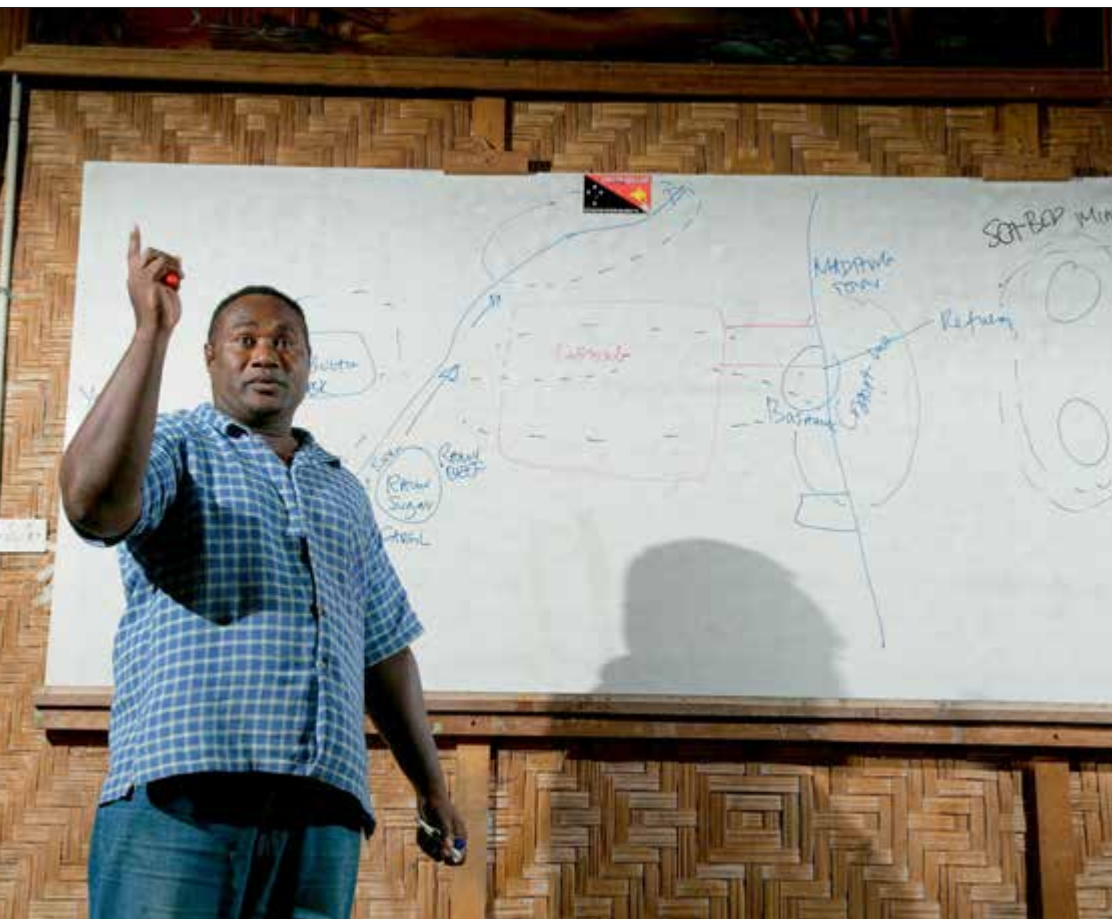
Für eine Förderung von Manganknollen durch nur ein Unternehmen sind keine signifikanten Auswirkungen auf die globalen Rohstoffmärkte für Mangan, Nickel, Kupfer und Kobalt zu erwarten, da die jeweiligen Beiträge zur weltweiten Bergwerksproduktion im Bereich von wenigen Prozent liegen (vgl. Tabelle 1). Sollten jedoch mehrere Unternehmen parallel Manganknollen fördern, könnte dies zumindest den Markt für Mangan beeinflussen. Dies wäre möglicherweise nachteilig für die Ausfuhrerlöse oder die Wirtschaft von Entwicklungsländern wie Südafrika, Gabun oder Ghana, verbunden mit entsprechenden sozialen Auswirkungen. Um dies zu vermeiden, ist die IMB laut Artikel 151 (10) des Seerechtsübereinkommens angehalten, Ausgleichszahlungen vorzunehmen oder sonstige die wirtschaftliche Anpassung erleichternde Hilfsmaßnahmen zu ergreifen.

Neben diesen beiden Aspekten sind auch soziale Auswirkungen aufgrund einer möglichen weiträumigen Drift von Suspensionswolken im tiefen Ozean nicht ausgeschlossen, da sie Fischereigebiete sowohl innerhalb der AWZ einzelner Staaten als auch auf Hoher See beeinflussen könnten, wenn die Abbaugelände in der Nähe liegen. Für die CCZ erscheint dies wenig wahrscheinlich, da die nächstgelegene Küste von Mexiko rund 1.700 Kilometer entfernt ist.

Für Massivsulfide und Mangankrusten besteht jedoch die Möglichkeit nachteiliger Effekte auf die Fischereiwirtschaft, da viele Vorkommen innerhalb der AWZ verschiedener Staaten liegen.

Anders als beim Abbau auf Hoher See sind für eine Produktion von Tiefseemineralen in einer AWZ eher direkte soziale Auswirkungen zu erwarten. Die Firma Nautilus Minerals ist beispielsweise auf starken Widerstand der lokalen Bevölkerung von Papua-Neuguinea gestoßen, die in der Nähe des Abbaufeldes „Solwara 1“ lebt. Die dort ansässigen Fischer hatten zuvor bereits negative Auswirkungen durch Verschmutzung landgebundener Bergwerksförderung erfahren und sind entsprechend skeptisch angesichts möglicher Auswirkungen durch den Abbau von Massivsulfiden vor ihrer Küste. Solche Bedenken können zu Konflikten zwischen Bevölkerungsgruppen führen, die einen Abbau aufgrund der zu erwartenden Gewinne befürworten und solchen, die sich dem wegen befürchteter Umweltverschmutzung entgegenstellen.

Ein positives Beispiel für den Umgang mit den Rohstoffen in der AWZ bieten die Cookinseln mit ihren 15.000 Einwohnern und weiteren rund 90.000 Staatsangehörigen, die in anderen Ländern, hauptsächlich Neuseeland, leben. So wie andere kleine Inselstaaten unter den Entwicklungsländern haben die Cookinseln nur sehr begrenzte Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Entwicklung. Um ihre Einnahmequellen zu diversifizieren, die zurzeit vor allem aus Tourismus und Fischerei bestehen, und um die wirtschaftliche Abhängigkeit von Neuseeland zu verringern, hat die Regierung die Vermarktung ihrer kobaltreichen Manganknollenvorkommen selbst in die Hand genommen. In einem langwierigen Informationsprozess wurden alle relevanten Interessengruppen inklusive der religiösen und traditionel-



Ein Sprecher der Umweltschutzinitiative Bismarck Ramu Group in Madang (Papua-Neuguinea). Die überwiegend indigene Bevölkerung, die in der artenreichen Bismarcksee fischt, leistet starken Widerstand gegen den Abbau von Tiefseemineralien. Die Fischer hatten bereits zuvor negative Auswirkungen durch Verschmutzung landgebundener Bergwerksförderung erfahren und sind dementsprechend skeptisch angesichts möglicher Auswirkungen durch den Tiefseebergbau.

picture alliance/dpa

len Führer der Cookinseln eingebunden. Darüber hinaus hat die nationale „Seabed Minerals Authority“ eine Gesetzgebung zum Tiefseebergbau entwickelt, die auch die Reduzierung von Umweltauswirkungen vorsieht. Erste Lizenzen zur detaillierten Erkundung der Vorkommen wurden bereits vergeben. Nach derzeitigem Kenntnisstand könnten allein die knollenreichsten Gebiete in der AWZ der Cookinseln, deren potentieller Wert rund drei Billionen US-Dollar beträgt, zwischen etwa 400 und 900 Jahre Abbau ermöglichen (Hein 2015; Petterson/Tawake 2019) und über die Förderabgaben zu einem langfristigen wirtschaftlichen Aufschwung beitragen, der der gesamten Bevölkerung zugutekommt. Die Mehrzahl der örtlichen Interessengruppen steht einem zukünftigen Tiefseebergbau deshalb positiv gegenüber. Widerstand wird hauptsächlich von externen, global agierenden Umweltgruppen organisiert (Petterson/Tawake 2019).

Fazit

Einen Tiefseebergbau gibt es bisher noch nicht, er stellt aber ein wirtschaftlich attraktives Zukunftsfeld dar. Die zu erschließenden Tiefseelagerstätten können die landgebundenen Lagerstätten jedoch nur ergänzen, nicht ersetzen. Der Umfang mariner Rohstoffvorkommen erscheint sowohl hinsichtlich der Metallanreicherungen als auch des Erschließungsaufwandes vielen Landlagerstätten vergleichbar und in Einzelfällen auch überlegen, insbesondere bezüglich verbreiteter Nutzungskonflikte an Land. Neben den rein rohstoffbezogenen Qualitäten bietet ein zu entwickelnder Tiefseebergbau herausragende Chancen für die Wirtschaft eines exportorientierten Hochtechnologielandes wie Deutschland. Zudem könnte Deutschland unabhängiger von Ländern wie Russland, Indonesien oder dem Kongo werden, deren Rohstoffe es aktuell für seine Wirtschaft benötigt. In Zeiten einer politisch unruhigen Welt ist es eine besondere Qualität, dass ein Großteil des Meeres hinsichtlich der Nutzung einheitlichen Regeln mit internationaler Kontrolle unterliegt.

Grundsätzlich sind Umweltbelastungen aber nicht vollständig zu vermeiden. Ein Bergbau in der Tiefsee wird definitiv langfristige Auswirkungen auf die dortige Lebewelt haben, dessen Ausmaß zurzeit nur grob abgeschätzt werden kann. Für die Manganknollen ist jedoch zu berücksichtigen, dass insgesamt nur etwa 15 Prozent der Gesamtfläche des fünf Millionen Quadratmeter großen Manganknollengürtels für einen Abbau in Frage kommen. Um diese 15 Prozent abzubauen, bräuchte ein Unternehmen mit einer Förderkapazität von 200 Quadratmeter pro Jahr rund 3.500 Jahre. Eine möglicherweise weiträumige Drift der Trübewolken könnte aber deutlich mehr als die genannten 15 Prozent der Gesamtfläche beeinträchtigen.

Letztlich ist eine Entscheidung erforderlich, ob die Metalle für den menschlichen Rohstoffhunger weiterhin ausschließlich aus den herkömmlichen Quellen an Land oder zukünftig zumindest zum Teil auch aus der Tiefsee gewonnen werden sollen. Beide bergbaulichen Maßnahmen sind immer mit Umweltauswirkungen verbunden, entweder an Land, in unserem Lebensraum, oder in über 4.000 Metern Wassertiefe, in der Tiefsee. Die potentiellen Auswirkungen eines Eingriffs in das Ökosystem der Tiefsee und die Wirksamkeit von Maßnahmen, die zu einer deutlichen Minderung dieser Auswirkungen führen können, müssen vor einem mögli-

chen Abbau detailliert untersucht werden. Deutschland mit seinen hohen Anforderungen an den Umweltschutz kann sich hier einbringen und für die künftige Nutzung von marinen mineralischen Rohstoffen umweltschonende Technologien entwickeln und effektive internationale Standards setzen.

LITERATUR

- Gillard, Benjamin/Purkiani, Kaveh/Chatziveangelou, Damianos/Vink, Annemiek/Iversen, Morton H./Thomsen, Laurenz (2019): Physical and Hydrodynamic Properties of Deep Sea Mining-Generated, Abyssal Sediment Plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (Eastern-Central Pacific). In: *Elementa*, 7 (1). DOI: <http://doi.org/10.1525/elementa.343> [08.11.2019].
- Glover, Adrian G./Dahlgren, Thomas G./Wiklund, Helena/Mohrbeck, Inga/Smith, Craig R. (2015): An End-to-End DNA Taxonomy Methodology for Benthic Biodiversity Survey in the Clarion-Clipperton Zone, Central Pacific Abyss. In: *Journal of Marine Science and Engineering* 4 (1), S. 2.
- Hannington, Mark A./Jonasson, Jan R./Herzig, Peter M./Petersen, Sven. (1995): Physical and Chemical Processes of Seafloor Mineralization at Mid-Ocean Ridges. In: Humphris, Susan E. et al. (Eds.): *Seafloor Hydrothermal Systems. Geophysical Monograph* 91, S. 115–157. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM091p0115> [08.11.2019].
- Hein, James R./Mizell, Kira/Koschinsky, Andrea/Conrad, Tracey A. (2013): Deep-Ocean Mineral Deposits as a Source of Critical Metals for High- and Green-Technology Applications: Comparison with Land-based Resources. In: *Ore Geology Reviews*, Volume 51 (June 2013), S. 1–14.
- Hein, James R./Spinardi, Francesca S./Okamoto, Nobuyuki/Mizell, Kira/Thorburn, Daryll/Tawake, Akuila (2015): Critical Metals in Manganese Nodules from the Cook Islands EEZ, Abundances and Distributions. In: *Ore Geology Review*, Volume 68, S. 97–116. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.12.011> [08.11.2019].
- International Seabed Authority (2010): A Geological Model of Polymetallic Nodule Deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone (Technical Study No. 6). International Seabed Authority, Kingston.
- Jankowski, Jacek A./Zielke, Werner (2001): The Mesoscale Sediment Transport Due to Technical Activities in the Deep Sea. In: *Deep-Sea Research*, Volume 48, Issues 17–18, S. 3487–3521.
- Jenisch, Uwe (2010): Renaissance des Meeresbodens. Mineralische Rohstoffe und Seerecht. In: *Zeitschrift für öffentliches Recht in Norddeutschland*, Teil 1: Heft 10/2010, S. 373–382, Teil 2: Heft 11/2010, S. 429–433.
- Paulikas, Daina/Katona, Steve (2019): Where Should Metals for the Green Transition Come From? Presentation at the International Seabed Authority Side Event, 24 July 2019.
- Kuhn, Thomas/Wegorzewski, Anna/Rühlemann, Carsten/Vink, Annemiek (2017): Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules. In: Sharma, Rahul (Ed.): *Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Springer International, Cham, S. 23–64.
- Okamoto, Nobuyuki/Shiokawa, Satoshi/Kawano, Seiya/Sakurai, Hironobu/Yamaji, Norihiro/Kurihara, Masaomi (2018): World's First Lifting Test for Polymetallic Sulphides in the EEZ of Japan. In: Morgan, Karynne Chong/Pedersen, Rolf B. (Eds.): *Advances in Marine Research and Subsea Technology Beyond Oil & Gas. Underwater Mining Conference 2019*, Bergen, S. 1–6.
- Petterson, Michael G./Tawake, Aakuia (2019): The Cook Islands (South Pacific) Experience in Governance of Seabed Manganese Nodule Mining. In: *Ocean & coastal management*, 167, S. 271–287. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman> [08.11.2019].
- Thiel, Hjalmar/Schriever, Gerd/Foell, Eberhard (2005): Polymetallic Nodule Mining, Waste Disposal, and Species Extinction at the Abyssal Seafloor. In: *Marine Georesources and Geotechnology* 23, S. 209–220.
- Thiel, Hjalmar/Borowski, Christian/Koschinsky, Andrea/Martinez-Arbizu, Pedro/Schriever, Gerd (2012): Umweltschutzaspekte beim Manganknollenabbau. In: *Schiff & Hafen*, 6/2012, S. 86–88.
- Jones, Daniel O. B. et al. (2017): Biological Responses to Disturbance From Simulated Deep-sea Polymetallic Nodule Mining. *PLOS One*. DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0171750> [08.11.2019].
- Vanreusel, Ann/Hilario, Ana/Ribeiro, Pedro A./Menot, Lenaick/Arbizu, Pedro M. (2016): Threatened by Mining, Polymetallic Nodules are Required to Preserve Abyssal Epifauna. In: *Scientific Reports*, 6, 26808. URL: <https://www.nature.com/articles/srep26808> [08.11.2019].



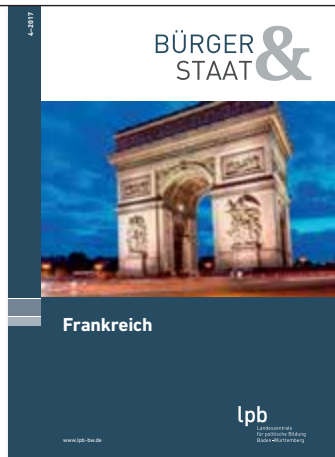
Dr. Carsten Rühlemann leitet den Arbeitsbereich „Marine Geologie, Tiefseebergbau“ an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Nach dem Studium der Kartographie in Berlin und der Geologie in Göttingen hat er an der Universität Bremen in der marinen Paläoklimaforschung promoviert und geforscht, bevor er 2003 in die BGR kam. Dort hat er zunächst die Klimadynamik im Indischen Ozean untersucht und ab 2006 die Exploration der Manganknollenvorkommen im deutschen Lizenzgebiet im Pazifik koordiniert. Er war an 24 Forschungsfahrten in den Atlantik, Indik und Pazifik beteiligt.



Dr. Thomas Kuhn hat Geologie an den Universitäten in Freiberg und Clausthal studiert und 1999 an der Freien Universität Berlin zur Geochemie von Eisen-Mangan-Krusten und Tiefseesedimenten promoviert. Er hat zehn Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Freiberg und am GEOMAR in Kiel gearbeitet, bevor er an die BGR wechselte. Die Schwerpunkte seiner derzeitigen Arbeiten liegen in der geologischen Erkundung der Manganknollenvorkommen im Pazifik einschließlich der Lagerstättenbewertung und in der metallurgischen Aufbereitung dieser marinen mineralischen Rohstoffe.



Dr. Annemiek Vink arbeitet als Meeresbiologin seit 2004 an der BGR. Dort ist sie verantwortlich für die Umweltuntersuchungen, die sich auf die Gewinnung von Grundlagendaten zur Meeresumwelt und Biodiversität im Lizenzgebiet konzentrieren und auch die Analyse von Auswirkungen eines möglichen zukünftigen Abbaus umfassen. Sie hat Biologie an der Universität in Utrecht (Niederlande) studiert und ab 1996 an der Universität Bremen zum Plankton und Paläoklima des Südatlantiks promoviert.



Für alle, die mehr wissen wollen - die Zeitschriften der Landeszentrale für politische Bildung BW

- BÜRGER & STAAT – Zeitschrift für Multiplikatoren politischer Bildung, Abonnement: 4 Hefte/Jahr 12.80 Euro, www.buergerimstaat.de
- POLITIK & UNTERRICHT – Zeitschrift für die Praxis der politischen Bildung, Abonnement: 4 Hefte/Jahr 14.00 Euro, www.politikundunterricht.de
- DEUTSCHLAND & EUROPA – Zeitschrift für Politik, Geschichte, Deutsch, Geografie und Kunst, Abonnement: 2 Hefte/Jahr 6.- Euro, www.deutschlandundeuropa.de

Bestellung oder Download als PDF, kostenlos (ab 500 g zzgl. Versand). Bestellung ausschließlich im Webshop der Landeszentrale: www.lpb-bw.de/zeitschriften.html