

## FAKTEN ■ ANALYSEN ■ WIRTSCHAFTLICHE HINTERGRUNDINFORMATIONEN

### MARINE MINERALISCHE ROHSTOFFE DER TIEFSEE - CHANCE UND HERAUSFORDERUNG

Michael Wiedicke, Thomas Kuhn, Carsten Rühlemann, Ulrich Schwarz-Schampera & Annemiek Vink

#### 1 EINLEITUNG

In Folge der starken Rohstoffnachfrage und des Anstiegs der Metallpreise während der letzten Dekade sind auch marine mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee wieder verstärkt ins Blickfeld der Wirtschaft gerückt. Hinter diesem Begriff verbergen sich drei unterschiedliche Rohstofftypen, (1) polymetallische Knollen, (2) kobaltreiche Eisen-Mangankrusten und (3) Massivsulfide, die als potenzielle Lieferanten für ein breites Spektrum unterschiedlicher Metalle gelten. Am bekanntesten sind die polymetallischen Knollen, die in einer ersten Blütezeit mariner Rohstofferkundung vor etwa 30 Jahren als eine nahezu unerschöpfliche Rohstoffquelle betrachtet wurden. Bis zu einem Abbau ist es damals nicht gekommen, wegen des Preisverfalls bei Rohstoffen und neuen Entwicklungen im globalen politischen und wirtschaftlichen Gefüge. Seitdem wurden die marinen Erkundungsmethoden beträchtlich weiterentwickelt. Die Seerechtskonvention bietet jetzt einen internationalen rechtlichen Rahmen und hohe Metallpreise treiben die Suche nach neuen Rohstoffvorkommen voran. Gleichzeitig steigt unser Bewusstsein für die Verletzlichkeit der marinen Umwelt. Dieser Beitrag in der Reihe COMMODITY TOP NEWS der BGR gibt einen Überblick über die avisierten Rohstofftypen und ihr Lagerstättenpotenzial, beschreibt die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und skizziert die Herausforderungen bei Abbauprozessen und möglichen Umwelteinwirkungen.

#### 2 ROHSTOFFTYPEN UND IHR POTENZIAL

Der Artikel konzentriert sich auf die marinen mineralischen Rohstoffe, die in Wassertiefen jenseits von 1000 m auftreten, häufig außerhalb der nationalen Hoheitsgebiete. Küstennah vorkommende Phosphorite, Sande und Kiese sowie Schwermineralanreicherungen sind nicht Gegenstand dieses Beitrags.



Abb. 1: Eine Meeresbodenprobe mit aufliegenden Manganknollen (untere Bildkante: 40 cm), Wassertiefe: 4400 m.

**Manganknollen:** Bei den polymetallischen Knollen, wegen ihres hohen Mangangehaltes auch Manganknollen genannt (Abb. 1), handelt es sich um schwarzbraune, teils runde, teils scheibenförmige und vielfach zwiebelschalenartig aufgebaute Konkretionen mit Durchmessern zwischen 1 und 15 cm. Sie bilden sich in den sediment-

bedeckten Tiefsee-Ebenen aller Ozeane in 4000 bis 6000 m Wassertiefe durch die Ausfällung von Mangan- und Eisenoxiden sowie zahlreichen Neben- und Spurenmitteln aus dem Meerwasser und dem Porenwasser des Sediments. Der sehr langsame Größenzuwachs liegt zwischen 2 und 100 mm/Mio. Jahre. Das größte und wirtschaftlich wichtigste Vorkommen befindet sich im äquatornahen Nordpazifik im sogenannten Manganknollengürtel zwischen Hawaii und Mexiko (Abb. 2). Weitere bedeutende Vorkommen liegen im Perubecken im Südpazifik und im zentralen Indischen Ozean. Der Manganknollengürtel wird von den Clarion- und Clipperton-Bruchzonen begrenzt und ist mit knapp 5 Mio. km<sup>2</sup> etwas größer als die Gesamtfläche der Länder der Europäischen Union. Hier sind gebietsweise 60% des Meeresbodens mit Manganknollen bedeckt und die Be-



Abb. 3: Eine 5-7 cm dicke Eisen-Mangankruste auf hellem Vulkangestein.

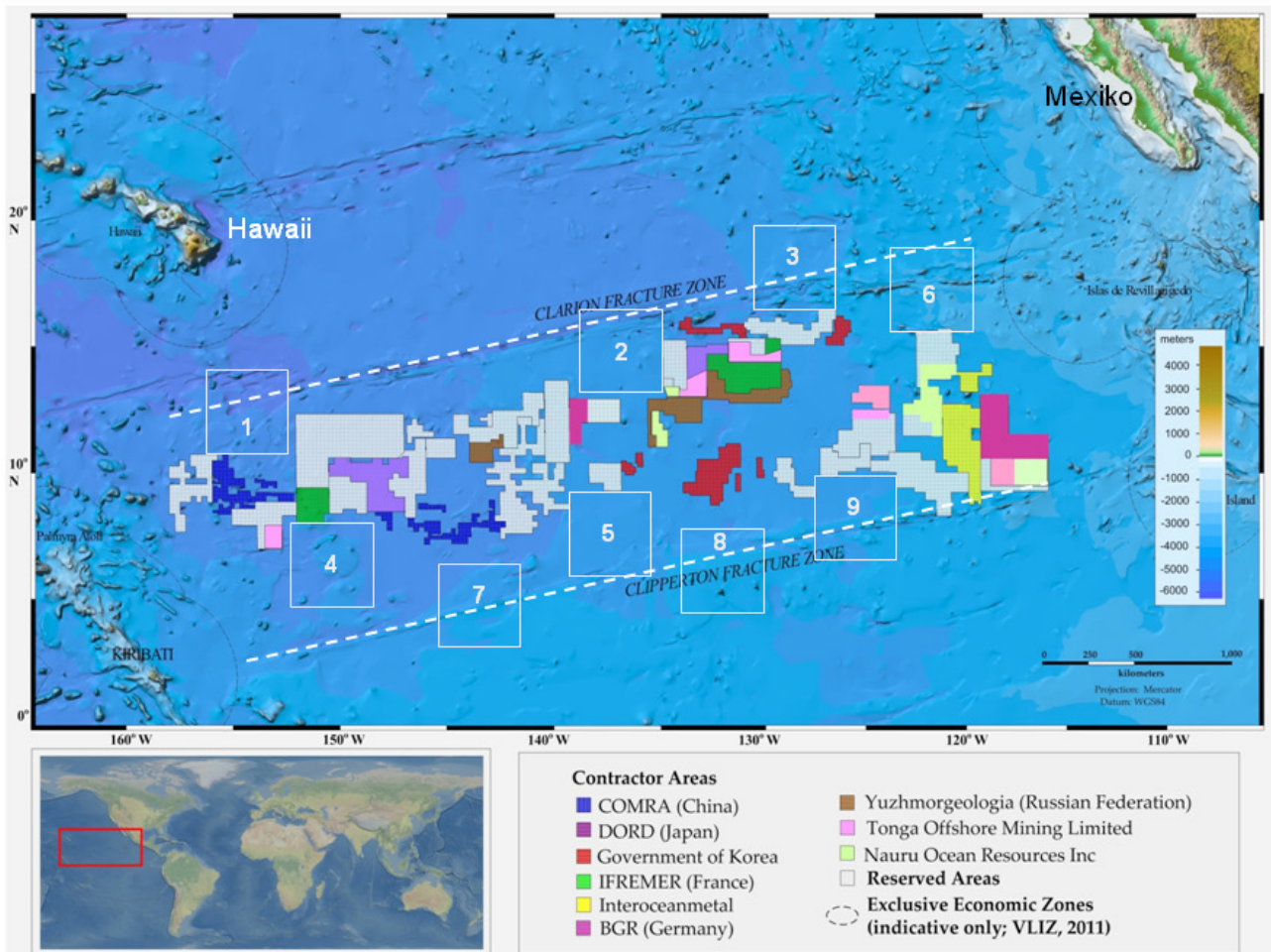


Abb. 2: Lizenzgebiete im pazifischen Manganknollengürtel zwischen den Clarion- und Clipperton-Bruchzonen, © Internationale Meeresbodenbehörde. Eingefügt sind neun Meeresschutzgebiete, deren Einrichtung durch die Internationale Meeresbodenbehörde derzeit diskutiert wird.

legungsdichte in diesen besonders knollenreichen Regionen liegt zwischen 10 und 20 kg Trockenmasse pro Quadratmeter. Wirtschaftlich interessant sind die Knollen in dieser Region vor allem wegen ihrer vergleichsweise hohen Gehalte an Kupfer, Nickel und Kobalt, die mit insgesamt 2,5 bis 3 Gewichtsprozent enthalten sind (Tab. 1) und u. a. für die Elektroindustrie, die Kommunikationsindustrie und die Stahlveredlung benötigt werden. Der durchschnittliche Mangangehalt von 30% trägt ebenfalls zum wirtschaftlichen Wert der Knollen bei. Daneben treten erhöhte Gehalte der Spurenmetalle Molybdän und Lithium sowie der Seltenen Erden auf. Die Gesamtmenge der Knollen im Manganknollengürtel wird auf 25 bis 40 Mrd. t geschätzt.

**Kobaltreiche Fe-Mn-Krusten:** Die kobaltreichen Eisen-Mangankrusten (Abb. 3) sind lagig aufgebaute Überzüge aus Eisen- und Manganoxiden, die sich auf sedimentfreien Hängen an großen untermeerischen Vul-

kanen (Seamounts) bilden, die zum Teil mehrere tausend Meter über die Tiefsee-Ebenen aufragen. Über viele Millionen Jahre kommen die durch Meeresströmungen sedimentfrei gehaltenen Hänge der Seamounts mit enormen Mengen an Meerwasser in Kontakt. Dabei werden die im Meerwasser gelösten Metalle als Eisen- und Manganoxide auf den Gesteinen der Seamounthänge ausgefällt. Die Eisen-Mangankrusten wachsen so Lage für Lage mit einer Rate von 1-7 mm/Mio. Jahre (Hein et al., 2010).

Bedingt durch die geringen Wachstumsraten, die sehr große Oberfläche (im Mittel 325 m<sup>2</sup>/g Krustenmaterial; Hein et al., 2010) und die hohe Porosität (durchschnittlich 50 – 60%) reichern die Krusten insbesondere Spurenmetalle an. Hierzu gehören Kobalt, Titan, Molybdän, Zirkon, Tellur, Wismut, Niob, Wolfram, die leichten Seltenen-Erd-Elemente sowie Platin, die zunehmend Einsatz in modernen High-Tech-Produkten finden (Tab. 1). Die Anreicherung dieser Elemente gegenüber den durch-

**Tab. 1: Elementkonzentrationen in Manganknollen und Eisen-Mangan-Krusten**

Element	Manganknollen		Fe-Mn-Krusten
	Clarion-Clipperton Zone <sup>1</sup>	Östl. deutsches Lizenzgebiet <sup>2</sup>	Pazifik-Seamounts <sup>3</sup>
Mangan (%)	25,4	31,2	22,1
Eisen (%)	6,90	6,20	15,1
Kupfer (%)	1,02	1,17	0,11
Nickel (%)	1,28	1,36	0,54
Kobalt (%)	0,24	0,16	0,64
Titan (%)	0,53	0,25	0,77
Molybdän (µg/g)	520	604	455
Zirkon (µg/g)	350	300	172
Lithium (µg/g)	108 <sup>2</sup>	130	63
Tellur (µg/g)	5,1 <sup>2</sup>	3,4	50 <sup>4</sup>
Niob (µg/g)	34 <sup>2</sup>	19	44 <sup>1</sup>
Wolfram (µg/g)	76	65	74 <sup>1</sup>
Platin (µg/g)	0,124 <sup>2</sup>	0,109	0,705 <sup>2</sup>
Cer (µg/g)	428 <sup>2</sup>	249	1105
Neodym (µg/g)	112 <sup>2</sup>	128	162
Dysprosium (µg/g)	24 <sup>2</sup>	27	58

Alle Angaben sind Mittelwerte.

Datenquellen: 1, 3: Hein et al. (2000). 2: BGR. 4: Hein et al. (2010).



**Abb. 4:** Massivsulfidprobe aus dem Indischen Ozean mit hohem Kupfergehalt.

schnittlichen Konzentrationen in der Erdkruste beträgt bis zu Faktor 10.000 (Tellur). 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 benötigt, Tellur wird für Kadmium-Tellur-Legierungen in der Dünnschichtphotovoltaik und für Wismut-Tellur-Legierungen in Computerchips eingesetzt.

Etwa 66 % dieser Vorkommen befinden sich im Pazifik (vor allem im Westpazifik), rund 23 % im Atlantik und nur 11 % im Indik. Als wirtschaftlich interessant werden Vorkommen in Wassertiefen zwischen 800 und 2500 m angesehen. Bei Schichtdicken zwischen 3 und 6 cm erreicht die lokale Bedeckung Werte von 60 bis 120 kg/m<sup>2</sup>. Im Gegensatz zu den Manganknollen sind die Eisen-Mangankrusten fest mit dem Untergrundgestein verwachsen, was eine besondere Herausforderung für einen möglichen Abbau darstellt. Die Gesamtmenge an trockener Erzsubstanz wird auf 40 Mrd. t geschätzt, von der etwa die Hälfte als potenziell gewinnungsfähig angesehen wird. Allerdings sind bis heute weniger als 10 % dieser Vorkommen detailliert untersucht worden, sodass die Abschätzung der Stoffmengen nur eine grobe Näherung darstellt.

**Massivsulfide:** Hydrothermale Vorkommen sind an vulkanische Strukturen, vor allem entlang ozeanischer Plattengrenzen, gebunden. Sie entstehen durch das Zirkulieren von Meerwasser durch die oberen drei Kilometer der ozeanischen Kruste, wobei das Meerwasser durch unterliegende Wärmequellen (Magma-kammern) aufgeheizt wird und Metalle aus den

vulkanischen Gesteinen mobilisiert. Spektakuläre Erscheinungen wie ‚Black Smoker‘ kennzeichnen die heutigen hydrothermal aktiven Zonen am Meeresboden in Wassertiefen zwischen 3000 m und weniger als 1600 m. Aus den Hochtemperaturlösungen fallen dort u. a. Metall-Schwefelverbindungen (Metallsulfide) aus (Abb. 4), die lokale Vererzungen von einigen hundert Metern Durchmesser 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.

Die Entstehungsweise aus Fluid-Zirkulationszellen über magmatischen Wärmequellen begünstigt nach heutigem Verständnis eher kleinere Vererzungen - ihre Größe wird auf weniger als 5 Mio. t geschätzt. Allerdings sind aus der geologischen Vergangenheit Vorkommen mit Tonnagen von bis zu 170 Mio. t bekannt. Auch ist mit einer sehr großen Zahl von Einzelvorkommen zu rechnen. Anders als etwa bei Manganknollen hat bisher keine gezielte Erkundung stattgefunden. Insbesondere Untersuchungen zur Ausdehnung und Tonnage fehlen weitestgehend. Zurzeit sind an die 150 Hochtemperaturaustritte mit Bildung massiver Metallsulfidanreicherungen in ‚Black Smokern‘ bekannt.

Das größte zurzeit bekannte Vorkommen ist ein geologischer Sonderfall: metallreicher Schlamm in Salzlagunen des Roten Meeres (Erzschlämme). Grobe Schätzungen des Wertmetallinhaltes eines einzelnen Vorkommens (Atlantis-Tief) liegen bei mehr als 90 Mio. t.

### 3 RECHTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Anders als an Land unterliegen Rohstoffe und ihre Gewinnung auf See außerhalb der nationalen Hoheitsgebiete internationalem Recht und der Kontrolle der Weltgemeinschaft (Jenisch, 2010). Den notwendigen Rahmen liefert das 1994 in Kraft getretene UN Seerechtsübereinkommen (SRÜ, engl. UNCLOS) und die für die Bodenschätze wichtige Ergänzung des ‚Durchführungsabkommens‘, dem nach heutigem Stand 140 Staaten und die EU beigetreten sind. Es regelt Zugang, Beantragung, zukünftige Gewinnung und den Schutz der Rohstoffe. Wichtigstes Organ ist die 1994 geschaffene Internationale Meeresbodenbehörde (IMB) mit Sitz

in Kingston (Jamaika), die das gemeinsame Erbe der Weltmeere für die Menschheit verwaltet, Rohstoff-spezifische Regelungen entwickelt und einen verantwortungsbewussten Umgang gewährleistet.

Für das Antragsverfahren erarbeitet die IMB sogenannte ‚Mining codes‘ für die verschiedenen Rohstofftypen. Diese Regelwerke liegen bisher nur für die Prospektion (Vorerkundung) und die Exploration (Erschließung) von Manganknollen und Massivsulfiden vor. Für die Exploration von Eisen-Mangankrusten sowie für einen zukünftigen Abbau aller drei Rohstofftypen müssen die Regelwerke erst noch geschaffen werden. Auf der Grundlage dieses Mining Codes hat Deutschland, vertreten durch die BGR, im Juli 2006 mit der IMB einen Explorationsvertrag abgeschlossen. Er umfasst zwei Gebiete im Manganknollengürtel, die insgesamt 75.000 km<sup>2</sup> groß sind. Der Vertrag gilt für 15 Jahre bis 2021 mit der Möglichkeit einer Verlängerung um 5 Jahre. Außerdem haben sieben weitere staatliche und zwei private Lizenznehmer Verträge zur Exploration von Manganknollen mit der IMB geschlossen. Bis auf Indien, dessen Lizenzgebiet sich im Indischen Ozean befindet, liegen alle anderen Gebiete im Manganknollengürtel (Abb. 2).

Die wirtschaftliche Nutzung der Tiefsee rückt angesichts des Anstiegs der Rohstoffpreise in den vergangenen Jahren verstärkt in den Fokus und könnte mittelfristig eine größere Bedeutung erlangen. Vor allem aufgrund der starken ökonomischen Entwicklung Chinas und der anderen BRIC-Staaten wird eine weiter steigende Nachfrage von Metallrohstoffen erwartet, die den Preisdruck in den kommenden Jahren erhöht. Deshalb interessieren sich sowohl staatliche Konsortien als auch internationale Bergbauunternehmen für die marinen mineralischen Rohstoffe. Ein zukünftiger Abbau wird beispielsweise bei den Manganknollen als wirtschaftlich rentabel angesehen, wenn die Knollen mit mindestens 10 kg Trockenmasse pro Quadratmeter auftreten und eine Gewinnung von ca. 2 Mio. t pro Jahr über einen Zeitraum von 20 Jahren möglich ist. Um diese Mengen zu gewährleisten, müssen Knollen von einer Fläche zwischen 100 und 200 km<sup>2</sup> pro Jahr abgebaut werden.

Die geschätzten Gesamtförderkosten von 35 Euro pro Tonne Manganknollen inklusive des Transports an Land (Kuhn et al., 2011) liegen deutlich unter den heutigen Preisen des reinen Metallwertes der Knollen für Kupfer, Nickel und Kobalt, die im März 2012 knapp 300 Euro/t betragen. Allerdings gehen alle Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen davon aus, dass die metallurgische Aufbe-

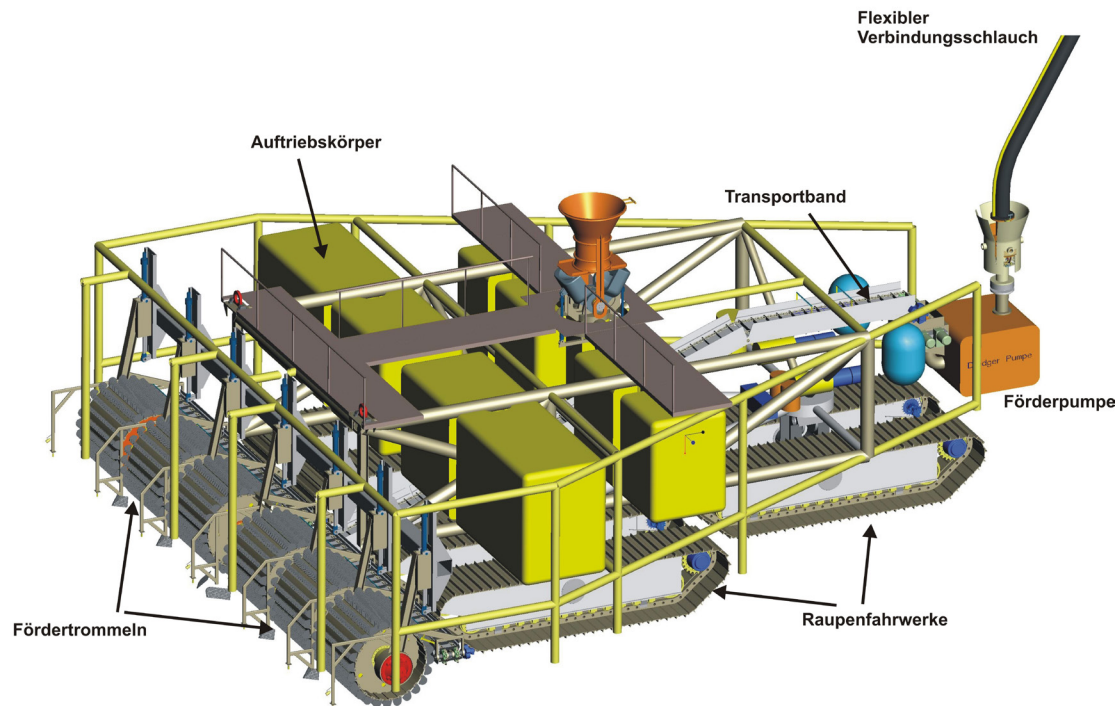
reitung der Knollen zwischen 50 und 80 Prozent der Investitions- und Operationskosten eines Manganknollenabbaus erfordert (Johnson und Otto, 1986; Yamazaki, 2008). Daher ist für den Manganknollenabbau aus ökonomischer Sicht vor allem die Entwicklung eines effektiven Verfahrens zur metallurgischen Aufbereitung der Manganknollen von entscheidender Bedeutung.

Darüber hinaus ist die Entwicklung einer über einen langen Zeitraum zuverlässig arbeitenden Fördertechnologie eine unerlässliche Voraussetzung, damit die Finanzierung eines Knollenabbauprojektes aus Sicht eines privaten Investors in Frage kommt. Dies zeigt sich auch bei der Bewertung des Knollenabbaus mit Cash-Flow-Modellen. Demnach wird der Abbau aus heutiger Sicht erst ab einer ‚Internal Rate of Return‘ (IRR, interner Zinsfuß) von 30 Prozent interessant, was insbesondere auf die großen technischen Unwägbarkeiten bei der Förderung aus der Tiefsee zurückzuführen ist (Johnson und Otto, 1986). Bisher veröffentlichte ökonomische Modellrechnungen liegen bei heutigen Metallpreisen mit einem IRR von maximal 25 Prozent nur knapp darunter. Die Amortisationsdauer für eine Gesamtinvestition von 1,3 Mrd. US\$ in ein Tiefseebergbauunternehmen inklusive Verhüttungsanlage und zusätzlichen 200 Mio. US\$ jährlichen Betriebskosten für Abbau, Transport und Aufbereitung schätzt Yamazaki (2008) bei vergleichbaren Metallpreisen wie sie heute vorliegen auf sechs Jahre. Diese wirtschaftlichen Überlegungen zeigen, dass ein Abbau jetzt in greifbare Nähe gerückt ist.

## 4 TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN

Um ausreichend hohe Fördermengen an Manganknollen zu erzielen, gehen aktuelle Konzepte für Abbausysteme von mindestens zwei parallel arbeitenden Kollektorsystemen aus, bei denen raupenähnliche Fahrzeuge die Manganknollen am Meeresboden aufnehmen (Abb. 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 Lufthebeverfahren oder mittels Dickstoffpumpen zur Förderplattform an der Wasseroberfläche gefördert. Dort werden die Knollen entwässert und für den Transport an Land auf Bulker-Schiffe verladen.

Die zu erwartenden technischen Herausforderungen liegen vor allem im zuverlässigen Betrieb der Unterwas-



**Abb. 5:** Entwurf eines selbstfahrenden Kollektors zum Sammeln von Manganknollen in der Tiefsee. Im Einsatz ist der Kollektor verkapselt, um möglichst wenig Sediment zu verwirbeln, © AkerWirth GmbH, Erkelenz.

sertechnik 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 u. a.) bereits eingesetzt werden, gibt es bisher keine Erfahrungen beim langfristigen Einsatz dieser Technik in der Tiefsee. Während es beim Design der Kollektorfahrzeuge zwischen den einzelnen Konzepten keine grundlegenden Unterschiede gibt, stehen sich mit dem Lufthebeverfahren und der Förderung mittels Dickstoffpumpen für den Vertikaltransport zwei unterschiedliche Verfahren gegenüber, die sich beide im Flachwasser bereits bewährt haben. Da sich mit Hilfe von Modellrechnungen zurzeit nicht klären lässt, welches das geeignetere Verfahren ist, können nur Versuche vor Ort im Rahmen von Pre-Pilot-Mining-Tests Klarheit schaffen.

Im Gegensatz zu den Manganknollen, die lose auf den unverfestigten, 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 Seamounthängen 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), Hochdruckwasserstrahlverfahren oder eine Kombination von beiden vor.

Im Gegensatz zu den marinen Massivsulfiden gibt es weder bei den Manganknollen noch bei den Eisen-Mangankrusten ein industriell etabliertes metallurgisches Extraktionsverfahren. Eine Kombination aus pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahren im

halbindustriellen Maßstab erbringt zwar gute Gewinnungsraten von zumeist über 90% für Kupfer, Kobalt und Nickel; diese Verfahren sind jedoch mit hohen Energie- und Umweltkosten verbunden und ermöglichen nicht die Gewinnung von Nebenprodukten wie Molybdän und Lithium in den Manganknollen oder Tellur und Seltene Erden in den Eisen-Mangankrusten. Die Etablierung von Extraktionsverfahren stellt in allen derzeitigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit mindestens 50% den größten Anteil der Investitionskosten. Eine Reduzierung dieses Kostenanteils würde den marinen Bergbau auf Manganknollen und Eisen-Mangankrusten deutlich näher an die Wirtschaftlichkeit bringen. Die Entwicklung von effektiven Extraktionsverfahren unter Einbeziehung moderner Ansätze (z. B. Mikrobiologie/Biomining) zur Gewinnung von Haupt- und Nebenprodukten sollte ein Schwerpunkt künftiger Forschungsarbeiten sein.

## 5 UMWELTAUSWIRKUNGEN

Für alle drei Rohstofftypen besteht die Sorge, dass ein zukünftiger Abbau biologische Ressourcen und die Artenvielfalt schädigen könnte, deren Schutz im Seerechtsübereinkommen zwar generell gefordert, aber im Detail nicht geregelt ist (Jenisch, 2010). Abhängig von der bislang noch nicht im industriellen Maßstab entwickelten Tiefseebergbautechnologie sind Auswirkungen vor allem auf die Bodenfauna zu erwarten, die bisher nur ansatzweise erforscht wurde. Kritiker befürchten insbesondere eine Schädigung von Bodenlebewesen durch die Kollektoren und erwarten mögliche großräumige Auswirkung eines Unterwasserbergbaus. Dazu zählen 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 Artikel 145 und Artikel 209 des Seerechtsübereinkommens (SRÜ) einem nachhaltigen marinen Umwelt- und Biodiversitätsschutz verpflichtet<sup>1</sup>; Die Notwendigkeit des Umweltschutzes wird entsprechend in allen Bestimmungen, Richtlinien und Empfehlungen der IMB hervorgehoben.

<sup>1</sup>SRÜ Artikel 145: Schutz der Meeresumwelt.

Hinsichtlich der Tätigkeiten im Gebiet werden in Übereinstimmung mit diesem Übereinkommen [SRÜ] die notwendigen Maßnahmen ergriffen, um die Meeresumwelt vor schädlichen Auswirkungen, die sich aus diesen Tätigkeiten ergeben können, wirksam zu schützen. Zu diesem Zweck beschließt die Behörde [IMB] geeignete Regeln, Vorschriften und Verfahren, um unter anderem ... b) die natürlichen Ressourcen des Gebiets zu schützen und zu erhalten sowie Schäden für die Tiere und Pflanzen der Meeresumwelt zu vermeiden.

**Manganknollen:** Mögliche Umweltauswirkungen des Abbaus sind nach den mineralischen Rohstofftypen zu unterscheiden. Bei Manganknollen ist die Abbaufäche mit geschätzten 200 km<sup>2</sup> pro Jahr vergleichsweise groß. Versuche am Meeresboden zur Beeinträchtigung des Ökosystems im sub-industriellen Maßstab haben gezeigt, dass sich eine funktionstüchtige Faunengemeinschaft auf den gestörten Flächen mit annähernd der gleichen Diversität wie zuvor nach etwa 5 bis 10 Jahren entwickeln kann (Thiel et al., 2005). Jedoch ist grundsätzlich mit einer angepassten Artenzusammensetzung und -verteilung zu rechnen, weil Organismen, die auf den Knollen leben oder deren Lebensweise durch das Hartsubstrat beeinflusst wird, sich in den gestörten Feldern nicht wieder ansiedeln können. Die Erholung ausgeglichener Lebensgemeinschaften in industriellen Abbaugebieten wird entscheidend von der Distanz zu den ungestörten Flächen abhängen (Thiel et al., 2012). Experimente am Meeresboden der Tiefsee haben gezeigt, dass sich die durch die Kollektoren aufgewirbelten Sedimente grobenteils im Umkreis von ca. 2 km wieder absetzen (Jankowski und Zielke, 2001).

**Massivsulfide:** Bei den Massivsulfiden sind die gegenwärtig diskutierten Abbaufächen mit weniger als 1 km<sup>2</sup> 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 Tiefsee-Arten das Hartsubstrat der inaktiven hydrothermalen Austrittsstellen. Lebewesen- und Hartsubstratverlust sowie die Entstehung von Trübewolken durch Abbau und Rückwassertransport gelten als potentiell schwerwiegendste Umwelteinwirkungen. Aufgrund der im Vergleich zu den Manganknollenfeldern relativ kleinen Abbaufäche, der Möglichkeit einer raschen Neubildung von Austrittsstellen in abgebauten aktiven Hydrothermalfeldern sowie durch das hohe Maß an Anpassungsvermögen der Lebewesen und die ohnehin stark variierenden natürlichen Umweltbedingungen werden die Umwelteinwirkungen insgesamt jedoch als gering eingeschätzt, zumal ein Abbau aktiver Felder ohnehin nicht vorgesehen ist.

**Kobaltreiche Fe-Mn-Krusten:** Für kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten 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



**Abb. 6:** Seegurke *Peniagone leander* über Manganknollenfeld im deutschen Lizenzgebiet

Rückstand durch den Abbau aufgrund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeit und dem Auftrieb von Wassermassen im Bereich der Seamounts vergleichsweise weit verdriften und gegebenenfalls auch in höhere Wasserschichten gelangen.

Für alle drei mineralischen Rohstofftypen der Tiefsee wird vorausgesetzt, dass eine Beeinträchtigung der Umwelt durch einen möglichen Abbau mit Hilfe eines umfangreichen Umweltmanagementplans (UMP) so gering wie möglich gehalten wird. Ein erster Schritt dazu ist die Entwicklung einer umweltschonenden Abbautechnik, die für Manganknollen zurzeit am weitesten fortgeschritten ist (Kuhn et al., 2011). Eine Schonung der Umwelt kann 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 (z. B. durch Ummantelung des Kollektors); (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 (Tailings).

Vertragliche Vereinbarungen mit der IMB sehen vor, dass jeder Vertragsnehmer schon während der 15-jährigen Explorationsphase Umwelt-Referenzdaten sammelt. Auf

Grundlage dieser Daten sollen die Auswirkungen möglicher zukünftiger Abbauprodukte noch vor dem Eingriff in den Lebensraum Tiefsee abgeschätzt und beurteilt werden. Der wichtigste Bestandteil dieser Umweltuntersuchungen sind Informationen über die Artenzusammensetzung und Besiedlungsdichte der Bodenfauna. Neben der Erfassung biologischer Daten werden auch umfangreiche Untersuchungen der ozeanographischen Gegebenheiten und der Sedimenteigenschaften gefordert. Um den Einfluss eines möglichen zukünftigen Manganknollen-Abbaus auf die Bodenfauna beurteilen zu können, müssen zuvor auf Grundlage der genannten Daten ungestörte Flächen (Preservation reference zones) ausgewiesen werden, die mit dann gestörten Flächen (Impact reference zones) verglichen werden können. Für eine Kontrolle der Auswirkungen müssen sich die Referenzgebiete hinsichtlich ihres Habitats (Artenzusammensetzung, Besiedlungsdichte) und der Knollendichte sowie der Sedimenteigenschaften gleichen. 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.

Die Umwelt- und vor allem die Biodiversitätsdaten der mittlerweile neun Lizenznehmer der Clarion-Clipperton-Zone im Pazifik sollen soweit wie möglich standardisiert werden und in einen Umweltmanagementplan der Meeresbodenbehörde einfließen. Derzeit wird in der IMB diskutiert, auf der Grundlage dieses Plans in der Clarion-Clipperton-Zone neun jeweils 160.000 km<sup>2</sup> großen Meeresschutzgebiete einzurichten, die zusammen ein Drittel der Gesamtfläche des Manganknollengürtels umfassen (Abb. 1). Innerhalb dieser Schutzgebiete soll kein Abbau stattfinden. Ein zentraler Bestandteil bei der Entscheidung über einen zukünftigen Abbau wird die Verpflichtung zur Vorlage einer Umweltverträglichkeitsstudie (Environmental Impact Assessment) sein. In eine solche Studie werden auch die Ergebnisse von ‚Pre-pilot mining tests‘ und dem damit verbundenen Vergleich von Umweltuntersuchungen vor und nach dem Test eingehen. Der konkrete Inhalt des Regelwerks zu den Bestimmungen des Umweltmanagementplans und der Umweltverträglichkeitsstudie wird zurzeit in der Rechts- und Fachkommission sowie der Versammlung der IMB diskutiert. Sofern ernsthafte Gründe für die Annahme bestehen, dass durch die Ausbeutung bestimmter Felder durch Vertragsnehmer schwere Schäden für die Meeresumwelt entstehen, ist die Rechts- und Fachkommission befugt, dem Rat der IMB zu empfehlen, diese Felder von der Ausbeutung auszuschließen<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> SRÜ Artikel 165: Die Rechts- und Fachkommission (2) (1).



## 6 ERWARTETER NUTZEN

Der generelle Nutzen eines zukünftigen Tiefseebergbaus besteht aus heutiger Sicht in mehreren Aspekten, die sowohl die Rohstoffe wie auch die Technologie umfassen und folgendermaßen skizziert werden können:

a) Marine mineralische Rohstoffvorkommen stellen neue zusätzliche Quellen dar, die bisher in Rohstoffpotenzialabschätzungen nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden. Dies begründet sich auf dem noch immer begrenzten Detailwissen. Sie bilden somit eine zurzeit nur grob abzuschätzende Erweiterung der bisher bekannten globalen Rohstoffbasis.

b) Wesentliche Anteile der hier vorgestellten marinen mineralischen Rohstoffvorkommen liegen fernab der Küsten und unterstehen rechtlich der Internationalen Meeresbodenbehörde. Ihre Erschließung und mögliche wirtschaftliche Nutzung wird auf der Basis langfristiger Verträge vergeben. Sie unterliegen somit nicht den Anfälligkeiten politisch teilweise instabiler rohstoffreicher Nationalstaaten. Deshalb können sie einen substantiel-

len Beitrag zur Diversifizierung der Bezugsquellen und zur langfristigen Versorgungssicherheit unseres Landes leisten.

c) Die Gewinnung von Rohstoffen aus der Tiefsee erfordert innovative technische Konzepte - von einer hochauflösenden Exploration bis hin zur Fördertechnologie und der metallurgischen Aufbereitung. Dabei gilt es, umweltschonende Detaillösungen zu entwickeln und beispielsweise die Zuverlässigkeit im Betrieb einer landfernen Förderanlage zu maximieren. Hier ist herausragende Ingenieurskunst und technisches Know-how erforderlich. Eine technologie- und exportorientierte Nation wie Deutschland sollte dies als Chance für die wirtschaftliche Ausgestaltung der Zukunft wahrnehmen.

## 7 FAZIT

Einen Tiefseebergbau gibt es bisher noch nicht, er stellt aber ein durchaus attraktives Zukunftsfeld dar. Dabei liegt die Rolle von zu erschließenden Erzvorkommen in der Ergänzung und Erweiterung der von Land bekannten Rohstoffbasis, und nicht im Ersatz des heute betriebenen klassischen Rohstoffbergbaus. Der Umfang mariner Rohstoffvorkommen lässt sich bisher nur grob abschätzen. Er erscheint aber sowohl hinsichtlich der Metallanreicherungen als auch des Erschließungsaufwandes vielen Landlagerstätten vergleichbar und in Einzelfällen auch überlegen. Neben den rein rohstoffbezogenen Qualitäten bietet ein zu entwickelnder Tiefseebergbau herausragende Chancen für die Wirtschaft eines exportorientierten Hochtechnologielandes wie Deutschland. 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. Derzeit liegen der IMB fünf weitere Anträge auf Exploration vor, drei davon für den Manganknollengürtel. Ein Beginn des Abbaus durch einen der Lizenznehmer in der kommenden Dekade erscheint denkbar. Deutschland mit seinen hohen Umweltstandards hat jetzt die Möglichkeit mit geeigneten technischen Entwicklungen den Weg für eine möglichst umweltverträgliche Gewinnung mariner mineralischer Rohstoffe zu bereiten.

Hannover, den 06.06.2012

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN  
UND ROHSTOFFE  
Stilleweg 2  
D-30655 Hannover

Michael.Wiedicke-Hombach@bgr.de  
Tel. 0511 - 6 43 27 93

Thomas.Kuhn@bgr.de  
Tel. 0511 - 6 43 37 80

Carsten.Ruehlemann@bgr.de  
Tel. 0511 - 6 43 24 12

Ulrich.Schwarz-Schampera@bgr.de  
Tel. 0511 - 6 43 22 32

Annemiek.Vink@bgr.de  
Tel. 0511 - 6 43 23 92

## 8 LITERATUR

HEIN, J.R., KOSCHINSKY, A., BAU, M., MANNHEIM, F.T., KANG, J.-K., AND ROBERTS, L. (2000). COBALT-RICH FERROMANGANESE CRUSTS IN THE PACIFIC. IN CRONAN, D.S.: HANDBOOK OF MARINE MINERAL DEPOSITS. CRC PRESS, BOCA RATON, PP. 239 – 279.

HEIN, J.R., CONRAD, T.A., STAUDIGEL, H. (2010). SEAMOUNT MINERAL DEPOSITS. A SOURCE OF RARE METALS FOR HIGH-TECHNOLOGY INDUSTRIES. OCEANOGRAPHY 23/1, 184-189.

JANKOWSKI, J.A., ZIELKE, W. (2001). THE MESOSCALE SEDIMENT TRANSPORT DUE TO TECHNICAL ACTIVITIES IN THE DEEP SEA. DEEP-SEA RESEARCH II 48, 3487-3521.

JENISCH, U. (2010). RENAISSANCE DES MEERESBODENS. MINERALISCHE ROHSTOFFE UND SEERECHT, , NORDÖR ZEITSCHRIFT FÜR ÖFFENTLICHES RECHT IN NORDDEUTSCHLAND, TEIL 1: HEFT 10/2010, 373-382, TEIL 2: HEFT 11/2010, 429-433.

JOHNSON, C. J. AND OTTO, J. M. (1986). MANGANESE NODULE PROJECT ECONOMICS. FACTORS RELATING TO THE PACIFIC REGION, RESOURCE POLICY, 12(1), 17-28.

KUHN, T., RÜHLEMANN, C., WIEDICKE-HOMBACH, M., RUTKOWSKY, J., VON WIRTH, H.-J., KOENIG, D., KLEINEN, T. UND MATHY, T. (2011). DIE FÖRDERUNG VON MANGANKNOLLEN AUS DER TIEFSEE. SCHIFF & HAFEN 5, 78-83.

THIEL, H., SCHRIEVER, G., FOELL, E. (2005). POLYMETALLIC NODULE MINING, WASTE DISPOSAL, AND SPECIES EXTINCTION AT THE ABYSSAL SEAFLOOR. MARINE GEORESOURCES AND GEOTECHNOLOGY 23, 209-220.

THIEL, H., BOROWSKI, C., KOSCHINSKY, A., MARTINEZ-ARBIZU, P., SCHRIEVER, G. (2012). UMWELTSCHUTZASPEKTE BEIM MANGANKNOLLENABBAU. SCHIFF & HAFEN 6, 86-88.

YAMAZAKI, T. (2008). MODEL MINING UNITS OF THE 20TH CENTURY AND THE ECONOMIES. PROC. OF THE SEVENTH (2008) ISOPE OCEAN MINING SYMPOSIUM, CHENNAI, 1-9.