

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

## Deep-sea Mining – a Future Source of Raw Materials?

The rising global demand for metals is starting to focus greater attention on the extraction of marine mineral resources (MMR) from deep sea. The term MMR essentially covers three different types of formation: manganese nodules, cobalt-rich ferromanganese crusts and massive sulphide deposits. All three of these natural resources provide the potential basis for a whole range of different metals. Germany has developed an interest for the explora-

tion of marine deposits. This paper outlines the types of deep-sea deposits available and their resource potential. It also describes the legal and commercial parameters involved and presents the challenges that will arise during the mining and extraction phase and the possible environmental impact of such operations.

## Tiefseebergbau – Rohstoffquelle der Zukunft?

Durch den global steigenden Bedarf an metallischen Rohstoffen sind auch marine mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee (MMR) wieder verstärkt ins Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt. Hinter diesem Begriff verbergen sich drei unterschiedliche Gesteinsbildungen: Manganknollen, kobaltreiche Eisen-Mangankrusten und Massivsulfide. Alle drei Rohstofftypen gelten als potentielle Lieferanten für ein breites Spektrum unterschiedlicher Metalle.

Auch Deutschland ist an der Erkundung der marinen Vorkommen interessiert. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die neuen tiefmarinen Rohstofftypen und ihr Lagerstättenpotential, beschreibt die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und skizziert die Herausforderungen bei Abbauverfahren und möglichen Umwelteinwirkungen.

### 1 Introduction

The increased global demand for (metallic) ores has started to focus ever greater public attention on the availability of marine mineral resources (MMR) on the deep ocean floor. The term MMR essentially covers three different types of rock formation:

- manganese nodules (polymetallic nodules)
- cobalt-rich ferromanganese crusts (polymetallic crusts) and
- massive sulphide deposits (polymetallic sulphides).

All three resource types provide the potential basis for a wide range of different metals. The best-known of these are the manganese nodules, which were first considered as a potential source of raw materials some 30 years ago. The operating conditions in this sector have now developed along positive lines: marine exploration techniques have become much more accurate and the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) has created an international legal framework for such activities. Rising demand and a decline in the metal content of existing land-based deposits are now driving the search for new, 'unconventional' resources. However, there is also a growing awareness of the frailty and vulnerability of the marine environment.

### 1 Einleitung

Durch den global steigenden Bedarf an (Metall-)Rohstoffen sind auch marine mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee (MMR) wieder verstärkt ins Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt. Hinter dem Begriff MMR verbergen sich drei unterschiedliche Gesteinsbildungen:

- Manganknollen (polymetallische Knollen),
- kobaltreiche Eisen-Mangankrusten (polymetallische Krusten) und
- Massivsulfide (polymetallische Sulfide).

Alle drei Rohstofftypen gelten als potentielle Lieferanten für ein breites Spektrum unterschiedlicher Metalle. Am bekanntesten sind die Manganknollen, die erstmals vor etwa 30 Jahren als mögliche Rohstoffquelle angesehen wurden. Mittlerweile haben sich die Rahmenbedingungen positiv weiterentwickelt: die marinen Erkundungsmethoden sind wesentlich präziser geworden und die Seerechtskonvention (United Nation Convention on the Law of the Sea – UNCLOS) bietet einen internationalen rechtlichen Rahmen. Und mittelfristig steigender Bedarf sowie sinkende Wertmetallgehalte in existierenden Lagerstätten an Land treiben

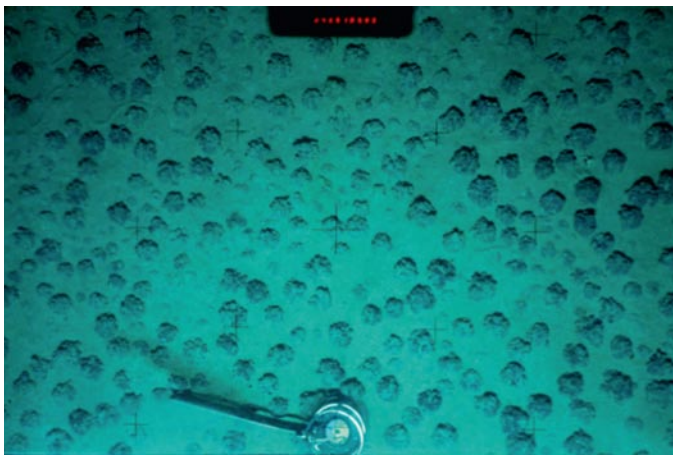


Fig. 1. Seabed densely covered with manganese nodules.

Water depth: 4,400 m.

Bild 1. Der Meeresboden mit dichter Belegung von Manganknollen, Wassertiefe: 4.400 m. Photo / Foto: BGR.

Germany too is now developing an interest for the exploration of marine deposits. Since 2006 the Hanover-based Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) has been actively engaged at an exploration site in the near-equatorial North Pacific to search for manganese nodule deposits. On May 6th, 2015, a second contract was signed for an exploration area in the central Indian Ocean that may contain valuable massive sulphide bodies.

## 2 Resource types and their potential

This article focuses on the marine mineral resources that are usually found at sea depths of more than 1,000 m, often outside national jurisdiction and the exclusive economic zones (EEZ). It also discusses cobalt-rich crusts, which do not currently feature in Germany's exploration plans. It does not include other potential marine resources, such as near-coastal phosphorites, sands and gravels and heavy-mineral concentrations of the foreshore.

### 2.1 Manganese nodules (polymetallic nodules)

Manganese nodules (Figure 1) are dark-brown, concentrically layered concretions of material and vary between 1 and 15 cm in diameter. They form in all sediment-covered deep ocean basins, usually at depths of between 4,000 and 6,000 m, and are created by the precipitation of Mn and Fe oxides and numerous minor and trace metals from the sea-water and sediment pore water. They grow very slowly at a rate of between 2 and 100 mm per million years. The largest and economically most important area of deposits lies in the near-equatorial North Pacific in the 'manganese nodule belt' that extends from Hawaii to Mexico (Figure 2). Other significant occurrences are to be found in the Peru basin in the South Pacific and in the central Indian Ocean. The Pacific manganese nodule belt covers an area of nearly 5 million km<sup>2</sup>, which is more than the entire land surface of the European Union. In some areas as much as 60% of the seabed is covered with nodules and in these mineral-rich regions the nodule abundance varies between 10 and >20 kg of dry matter per square metre. The nodules in this area are of special economic interest mainly because of their relatively high content of copper, nickel and cobalt, which is collectively present at levels of 2.5 to 3% by weight. These metals

die Suche nach neuen und „unkonventionellen“ Rohstoffvorkommen voran. Gleichzeitig steigt aber auch das Bewusstsein für die Verletzlichkeit der marinen Umwelt.

Auch Deutschland ist an der Erkundung der marinen Vorkommen interessiert. Für den Rohstofftyp „Manganknollen“ erkundet die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, seit 2006 ein Explorationsareal im äquatornahen Nordpazifik und für den Rohstofftyp „Massivsulfide“ wurde am 6. Mai 2015 ein entsprechender Vertrag für ein Explorationsareal im zentralen Indischen Ozean unterzeichnet.

## 2 Rohstofftypen und ihr Potenzial

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die marinen mineralischen Rohstoffe, die meist in Wassertiefen jenseits von 1.000 m auftreten, häufig außerhalb der nationalen Hoheitsgebiete und der exklusiven Wirtschaftszone (AWZ, engl. EEZ). Er schließt auch die kobaltreichen Krusten ein, für die Deutschland bisher keine Explorationstätigkeiten geplant hat. Andere potentielle marine Rohstoffe, wie küstennah vorkommende Phosphorite, Sande und Kiese sowie Schwermineralanreicherungen des Vorstrandes sind nicht Gegenstand dieses Beitrags.

### 2.1 Manganknollen (Polymetallische Knollen)

Bei den Manganknollen (Bild 1) handelt es sich um schwarzbraune rundliche und vielfach zwiebelschalenartig aufgebaute Konkretionen mit Durchmessern zwischen 1 und 15 cm. Sie bilden sich in den sedimentbedeckten Tiefsee-Ebenen aller Ozeane meist in 4.000 bis 6.000 m Wassertiefe durch die Ausfällung von Mn- und Fe-Oxiden sowie zahlreichen Neben- und Spurenmetallen aus dem Meerwasser und dem Porenwasser des Sediments. Der sehr langsame Größenwuchs 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 (Bild 2). Weitere bedeutende Vorkommen liegen im Perubecken im Südpazifik und im zentralen Indischen Ozean. Der pazifische Manganknollengürtel ist mit knapp 5 Mio. km<sup>2</sup> etwas größer als die Gesamtfläche der Länder der Europäischen Union. Hier sind gebietsweise bis zu 60% des Meeresbodens mit Manganknollen bedeckt und die Belegungsdichte 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 und u. a. für die Elektroindustrie, die Kommunikationsindustrie und die Stahlveredlung benötigt werden. Weitere Wertanteile bilden der hohe Mangangehalt (im Mittel 30%), sowie erhöhte Gehalte der Spurenmetalle Molybdän und Lithium und der leichten Seltenen Erden. Die Gesamtmenge der Knollen im Manganknollengürtel wird auf 25 bis 40 Mrd. t geschätzt (1).

### 2.2 Kobaltreiche Eisen-Mangankrusten (polymetallische Krusten)

Eisen-Mangankrusten (Bild 3) sind lagig aufgebaute Überzüge aus Eisen- und Manganoxiden, die sich auf den Hängen großer untermeerischer Berge – sogenannter Seamounts – und Plateaus abscheiden. Durch die viele Millionen Jahre dauernde Expositi-

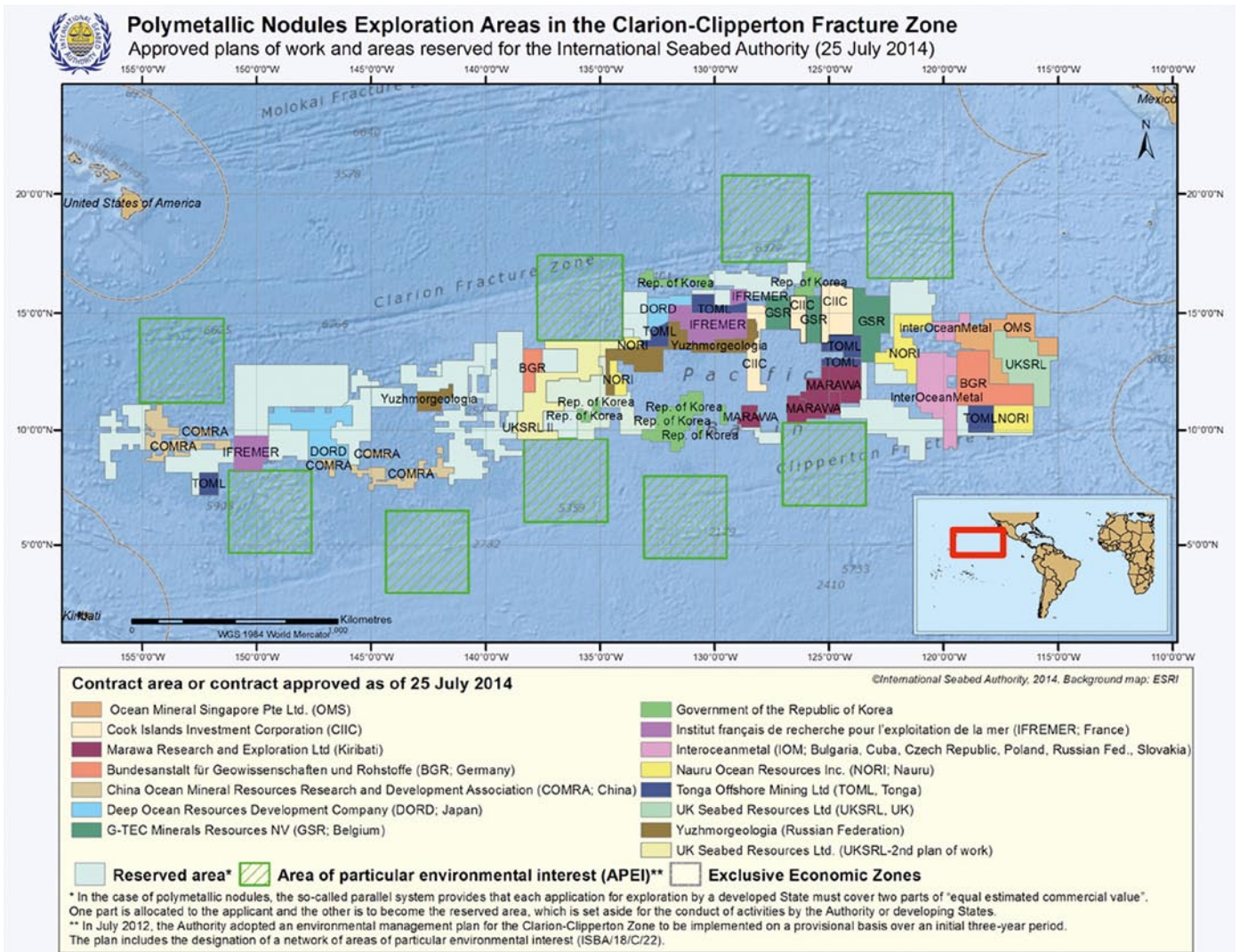


Fig. 2. Almost all international license areas for the exploration of manganese nodules lie in the Pacific manganese nodule belt between Hawaii, Mexico and the Equator. Source: International Seabed Authority

Bild 2. Fast alle internationalen Lizenzgebiete zur Exploration von Manganknollen liegen im pazifischen Manganknollengürtel, zwischen Hawaii, Mexiko und dem Äquator. Quelle: Internationale Meeresbodenbehörde.

play a key role in the electrical, electronics and communications industries and in the steel refining sector. The deposits are also highly valued for their high manganese content (30% on average) and for their increased levels of the trace metals molybdenum and lithium and light rare earth elements. The total quantity of nodules in the manganese nodule belt is estimated to range between 25 and 40 bn t (1).

## 2.2 Cobalt-rich ferromanganese crusts (polymetallic crusts)

Ferromanganese crusts (Figure 3) are laminated encrustations of iron and manganese oxide that are deposited on the slopes of submarine mountains ('seamounts') and plateaus. These mountain areas were kept sediment-free by sea currents over many millions of years of exposure, during which the metals dissolved in the sea water were successively precipitated on the seamount slopes as iron and manganese oxides. Ferromanganese crusts grow in this way layer by layer at a rate of 1 to 7 mm per million years (2).

Their slow rate of growth and very large porosity-related internal surface area – about 325 m<sup>2</sup>/g (3) – means that these crusts

on, in denen diese Hochgebiete durch Meeresströmungen sedimentfrei gehalten werden, werden sukzessive im Meerwasser gelöste Metalle als Eisen- und Manganoxide auf den Hängen der Seamounts ausgefällt. Die Eisen-Mangankrusten wachsen so Lage für Lage mit einer Rate von 1 bis 7 mm/Mio. Jahre (2).

Bedingt durch langsames Wachstum und die porositätsbedingt sehr große innere Oberfläche – etwa 325 m<sup>2</sup>/g (3) – sind die Krusten in der Lage, unterschiedliche Spurenelemente anzureichern, die heutzutage Einsatz in modernen High-Tech- und Verbraucherelektronikprodukten finden. Hierzu gehören Kobalt, Titan, Molybdän, Zirkon, Tellur, Wismut, Niob, Wolfram, die Seltenen-Erd-Elemente sowie Platin. Neben Kobalt wird der Gewinnung von Tellur aus den Eisen-Mangankrusten das größte wirtschaftliche Potential beigemessen. Kobalt wird im Rahmen neuer Technologien vor allem in Batterien von Hybrid- und Elektroautos benötigt, Tellur wird für Cadmium-Tellur-Legierungen in der Dünnschichtphotovoltaik und für Wismut-Tellur-Legierungen in Computerchips eingesetzt.

Etwa 66% der heute bekannten potentiellen Lagerstätten befinden sich im Pazifik, rund 23% im Atlantik und nur 11% im In-





Fig. 3. Black ferromanganese crust, 5 - 7 cm thick, on light-coloured volcanic rock.

Bild 3. Schwarze, 5 – 7 cm dicke Eisen-Mangankruste auf hellem Vulkangestein. Photo / Foto: BGR.

are able to accumulate all kinds of trace elements that are now being used in today's high-tech and consumer electronic products. These include cobalt, titanium, molybdenum, zirconium, tellurium, bismuth, niobium, tungsten, the rare earth elements and platinum. Along with cobalt, the tellurium content of ferromanganese crusts is considered to offer the most promising commercial potential. Cobalt is required in a number of new technologies, primarily in the manufacture of batteries for hybrid and electric vehicles, while tellurium is used for cadmium-tellurium alloys in thin-film photovoltaics and for the bismuth-tellurium alloys needed for making computer chips.

About 66% of the known potential deposits are located in the Pacific, with around 23% in the Atlantic and just 11% in the Indian Ocean. The focus of commercial interest lies on those deposits located at a depth of between 800 and 2,500 m. Given a layer thickness of 3 to 6 cm, the local coverage in this region can reach values of 60 to 120 kg/m<sup>2</sup>. Unlike manganese nodules, the ferromanganese crusts form an integral part of the substrate, a fact that poses a special challenge for the extraction process. The total quantity of dry ore material is estimated at 40 bn t, of which about half is deemed to be potentially recoverable. It should be noted that, as things stand at present, less than 10% of these deposits have been surveyed in any detail and so any assessment of the quantities involved can only be a rough approximation.

### 2.3 Massive sulphide deposits

Hydrothermal deposits are associated with volcanic structures, especially along mid-ocean ridges, back-arc spreading zones and island arcs. They are created by the circulation of sea water through the upper 3 km of the oceanic crust, whereby the water is heated by underlying heat sources (magma chambers) and is transformed into an aggressive fluid, leading to the mobilization of metals from the volcanic rock (4). Spectacular phenomena such as black smokers indicate active hydrothermal zones on the seabed at average water depths of between 3,000 m and 1,600 m. Metallic sulphur compounds (metal sulphides) and other substances are precipitated from these high-temperature solutions



Fig. 4. Massive sulphide sample with high copper content, taken from the Indian Ocean.

Bild 4. Massivsulfidprobe aus dem Indischen Ozean mit hohem Kupfergehalt. Photo / Foto: BGR.

dik. Als wirtschaftlich interessant werden Vorkommen in Wassertiefen zwischen 800 und 2.500 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 potentiell gewinnungsfähig angesehen wird. Allerdings sind bis heute weniger als 10% dieser Vorkommen detailliert untersucht worden, so dass die Abschätzung der Stoffmengen nur eine grobe Näherung darstellt.

### 2.3 Massivsulfide

Hydrothermale Vorkommen sind an vulkanische Strukturen, vor allem entlang Mittelozeanischer Rücken, Backarc-Spreizungszonen oder Inselbögen gebunden. Sie entstehen durch das Zirkulieren von Meerwasser durch die oberen ca. 3 km der ozeanischen Kruste, wobei das Meerwasser durch unterliegende Wärmequellen (Magmakammer) aufgeheizt wird und sich in ein aggressives Fluid umwandelt, so dass es Metalle aus den vulkanischen Gesteinen mobilisiert (4). Spektakuläre Erscheinungen wie ‚Black Smoker‘ kennzeichnen die heutigen hydrothermal aktiven Zonen am Meeresboden in Wassertiefen zwischen mehr als 3.000 m und weniger als 1.600 m. Aus den Hochtemperaturlösungen fallen dort u.a. Metall-Schwefelverbindungen (Metallsulfide) aus (Bild 4), die lokale Lagerstätten 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 meist <5 Mio. t geschätzt. Allerdings sind aus der geologischen Vergangenheit Vorkommen mit Tonnagen von bis zu 170 Mio. t bekannt, z.B. die Lagerstätte Kidd Creek in Ontario, Kanada. Auch ist mit einer sehr

(Figure 4) and this material can form local deposits several hundred metres in diameter. The commercial interest here is focused on the high non-ferrous metal content (copper, zinc and lead) and, more particularly, on precious metals such as gold and silver and trace metals, which include indium, tellurium, germanium, bismuth, cobalt and selenium.

According to our current understanding, the origin from connecting fluid-circulation cells via magmatic heat sources tends to favour mineralisation zones whose size can be estimated at 5 million t or less. However, deposits containing as much as 170 million t have been known from the geological past, such as those at Kidd Creek in Ontario, Canada. Operations to extract these materials will have to deal with a very large number of individual sites. The limited extent and three-dimensional form of the deposits, which are only accessible on a superficial level, makes the exploration process much more difficult than in the case of manganese nodules, for example. However, no investigations have been undertaken to determine the extent and tonnage of the deposits. At present we know of the existence of more than 150 high-temperature emissions with the formation of massive sulphide deposits associated with black smokers (5).

The largest known deposit at present is a geological exception: metal-rich sludge in the brine of the Red Sea (ore sludge). Rough estimates put the metal content of an individual area of deposits known as the Atlantis Deep at more than 90 million t.

### 3 Legal and commercial conditions

Marine resources and their extraction in areas that lie outside sovereign territory differ from land-based deposits in that they are now subject to much more stringent international law and the control of the world community. The regulatory framework for this is laid down in the UN Convention on the Law of the Sea (UNCLOS), which came into force in 1994, and in the amendment to the implementing agreement, which relates to natural resources, as now signed by some 167 countries and the EU. This regulates access to, applications for and the future extraction and protection of the resources. The main body is the International Seabed Authority (ISA) based in Kingston (Jamaica), which was established in 1994. The ISA regulates the world's marine assets for the common benefit of mankind, develops resource-specific regulations and ensures that the seas' resources are dealt with in a responsible manner.

The ISA lays down application procedures ('mining codes') for the different resource types. Up until now these codes have only applied to the prospection and exploration phase. Detailed draft proposals are currently being discussed at expert-group level to incorporate future mining activities into these procedures.

On the basis of the exploration code, Germany, as represented by the BGR, signed an exploration agreement with the ISA in July 2006. This relates to two areas in the manganese nodule belt with a total surface area of 75,000 km<sup>2</sup> (Figure 2). The contract runs for a period of 15 years until 2021, with the option for it to be extended by five years. By the end of 2014 a further 15 state and private licensees had taken out contracts with the ISA to explore for manganese nodules, or had applied for concession areas (6). Apart from India, whose licensing area is located in the Indian Ocean, all the exploration areas are sited in the manganese nodule belt.

großen Zahl von Einzelvorkommen zu rechnen. Durch die geringe Ausdehnung und durch die dreidimensionale Form der Vorkommen, die nur oberflächlich zugänglich sind, ist die Erkundung deutlich schwieriger als etwa bei Manganknollen. Insbesondere Untersuchungen zur Ausdehnung und Tonnage fehlen weitestgehend. Zurzeit sind an die 150 Hochtemperaturaustritte mit Bildung massiver Metallsulfidaneicherungen in 'Black Smokern' bekannt (5).

Das größte z.Zt. bekannte Vorkommen ist ein geologischer Sonderfall: Metallreicher Schlamm in Salzlaugen 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 sehr viel stärker internationalem Recht und der Kontrolle der Weltgemeinschaft. 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 167 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, rohstoffspezifische 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 Explorationsphase (Erschließung) vor. Für einen zukünftigen Abbau wird z. Zt. ein detaillierter Entwurf in den Fachgremien diskutiert.

Auf der Grundlage des Explorationsregelwerks hat Deutschland – vertreten durch die BGR – mit der IMB im Juli 2006 einen Explorationsvertrag abgeschlossen. Er umfasst zwei Gebiete im Manganknollengürtel, die insgesamt 75.000 km<sup>2</sup> groß sind (Bild 2). Der Vertrag gilt für 15 Jahre bis 2021 mit der Möglichkeit einer Verlängerung um fünf Jahre. Außerdem haben bis Ende 2014 weitere 15 staatliche und private Lizenznehmer Verträge zur Exploration von Manganknollen mit der IMB geschlossen bzw. Lizenzgebiete beantragt (6). Bis auf Indien, dessen Lizenzgebiet sich im Indischen Ozean befindet, liegen alle anderen Gebiete im Manganknollengürtel.

Ein zweiter deutscher Explorationsvertrag – nun für die Erschließung von Sulfidvorkommen im zentralen Indischen Ozean – ist von IMB und BGR im Mai 2015 unterzeichnet worden. Seine Laufzeit endet im Jahr 2030. Ab 2011 haben neben Deutschland weitere fünf staatliche Lizenznehmer Verträge zur Exploration von Massivsulfiden mit der IMB geschlossen bzw. Lizenzgebiete beantragt – im südlichen und zentralen Indischen Ozean sowie auf dem mittelatlantischen Rücken. Seit dem Jahr 2014 gibt es nun auch vier Lizenzen zur Exploration von polymetallischen Krusten im westlichen Pazifik und Atlantik.

Die wirtschaftliche Nutzung der Tiefsee rückt also weiter

A second German exploration agreement – this time to explore sulphide deposits in the central Indian Ocean – was signed by the ISA and the BGR in May 2015. This agreement runs until 2030. Since 2011 Germany and five other state licensees have concluded agreements with the ISA to explore for massive sulphide deposits, or have applied for concession areas, both in the southern and central Indian Ocean and at the mid-Atlantic Ridge. In 2014 a further four licences were awarded for the exploration of polymetallic crusts in the western Pacific and Atlantic.

The commercial use of the deep sea is therefore gathering increased worldwide attention and could well assume greater significance in the medium term. Given the strong economic development taking place in China and other BRIC states (Brazil, Russia, India and China) it is likely that, in spite of the possibility of fluctuations in the short term, the ongoing increase in the demand for metal ores will only drive up prices in the years ahead. State-owned groups and international mining companies alike are now showing an interest in marine mineral resources. The mining scenario projected by the BGR is based on the extraction of 2 million t of nodules a year over a period of 20 years. Given a ratio of 10 kg of dry material per m<sup>2</sup> this would involve extracting an area of nodules between 100 and 200 km<sup>2</sup> per year (by comparison: the city of Hamburg has a surface area of 755 km<sup>2</sup>). Finally, the challenging task of processing this extremely fine-grained and complex metallic ore is not to be underestimated. As this part of the process chain usually demands 50% of the investment and operating costs (7, 8), any operation to use

in den Fokus und könnte mittelfristig eine größere Bedeutung erlangen. Vor allem auf Grund der starken ökonomischen Entwicklung Chinas und anderer BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China) wird auch bei möglichen kurzfristigen Schwankungen eine mittelfristig weiter steigende Nachfrage von Metallrohstoffen erwartet, die den Preis in den kommenden Jahren erhöht. Mittlerweile interessieren sich sowohl staatliche Konsortien als auch internationale Bergbauunternehmen für die marinen mineralischen Rohstoffe. Als Eckpunkte für ein Abbau-Szenario sieht die BGR die Gewinnung von 2 Mio. t Knollen pro Jahr über einen Zeitraum von 20 Jahren. Bei 10 kg Trockenmasse pro Quadratmeter müssten pro Jahr Knollen von einer Fläche zwischen 100 und 200 km<sup>2</sup> abgebaut werden (zum Vergleich: Hamburg hat eine Fläche von 755 km<sup>2</sup>). Anspruchsvoll ist auch die metallurgische Aufbereitung dieses sehr feinkörnigen komplex zusammengesetzten Materials. Da dieses Segment der Prozesskette i. d. R. mehr als 50% der Investitions- und Betriebskosten erfordert (7, 8), ist aus ökonomischer Sicht ein effektives Verfahren zur metallurgischen Aufbereitung von entscheidender Bedeutung für die Nutzung von Manganknollen als Rohstoffquelle (s. Kap. 4).

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

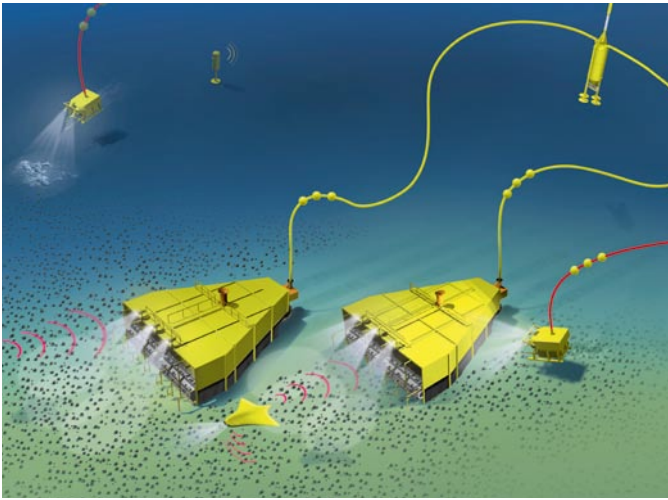


Fig. 5. Two self-propelled collectors are winning manganese nodules from the seabed. The crushed nodules are pumped via flexible pipes to a temporary storage they both share (top right), from where the ore-water composite is pumped via tubing to the production ship.

Bild 5. Zwei selbstfahrende Kollektoren beim Sammeln von Manganknollen in der Tiefsee. Die zerkleinerten Knollen werden über flexible Leitungen zum gemeinsamen Zwischenspeicher gepumpt (rechts oben), von dem aus das Erz-Wassergemisch über einen Rohrstrang zum Förderschiff transportiert wird.

Source/Quelle: M.H. Wirth.

manganese nodules as a source of raw materials will depend decisively, from an economic viewpoint, on the availability of effective metallurgical extraction techniques (see Section 4).

Moreover, the development of production technology capable of operating reliably over long periods of time will be an essential factor when it comes to attracting private investors to finance any nodule mining project. This becomes apparent when nodule mining is assessed using cash-flow models. From the current perspective such a mining venture only becomes attractive when the 'internal rate of return' (IRR) is higher than 30%, a fact that can be primarily attributed to the huge technical uncertainties associated with extracting material from the deep sea beds (7). Set against today's metal prices, previously published economic model calculations also indicated an IRR of maximum 25%, which is only slightly below the current figure. According to Yamazaki (8), and based on comparable metal prices as they are today, the payback period for a total investment of 1.3 bn US\$ in a deep sea mining enterprise – including a smelting plant and an additional 200 million US\$ a year by way of operating costs for mining, transport and ore preparation – can be set at six years. These economic considerations indicate that mining projects of this kind are gradually reaching a tangible stage.

#### 4 Technical challenges

In order to obtain sufficient quantities of manganese nodules the current mining concept proposes to use at least two collector systems working in parallel, with caterpillar-like vehicles scooping up the nodules from the seabed (Figure 5). Once on the collector the nodules will be cleaned of sediment, crushed and transferred to a vertical riser system. The material will then be conveyed to a floating production platform, either using an airlift system or a solids pumping unit. When they arrive at the surface the nodules will be dewatered and loaded on to bulk carriers for transport to shore.

Sicht erst ab einer „Internal Rate of Return“ (IRR, interner Zinsfuß) von 30% interessant, was insbesondere auf die großen technischen Unwägbarkeiten bei der Förderung aus der Tiefsee zurückzuführen ist (7). Bisher veröffentlichte ökonomische Modellrechnungen liegen bei heutigen Metallpreisen mit einem IRR von maximal 25% 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 (8) 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 (Bild 5). Die Knollen werden auf dem Kollektor von anhaftendem Sediment gereinigt, zerkleinert und an ein vertikales Fördersystem übergeben. Die Knollen werden je nach Konzept über ein Lufthebeverfahren oder mittels Dickstoffpumpen zur Förderplattform an der Wasseroberfläche gefördert. Dort werden die Knollen entwässert und für den Transport an Land auf Bulkerschiffe verladen.

Die zu erwartenden technischen Herausforderungen liegen vor allem im zuverlässigen Betrieb der Unterwassertechnik 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 Kiesen, Sanden und Seifenlagerstätten bereits eingesetzt werden, gibt es bisher keine Erfahrungen beim langfristigen Einsatz dieser Technik in der Tiefsee. Für den Antrieb eines Kollektorfahrzeugs werden Kettenantrieb und „archimedische Schraube“ diskutiert, und bei der Methodik des vertikalen Transports stehen sich mit dem Lufthebeverfahren und der Förderung mittels Dickstoffpumpen zwei unterschiedliche Verfahren gegenüber, die sich beide im Flachwasser bereits bewährt haben. Da sich mit Hilfe von Modellrechnungen z. Zt. nicht klären lässt, welches das geeignetere Verfahren ist, können nur Versuche vor Ort im Rahmen von Pre-Pilot-Mining-Tests Klarheit schaffen.

Anders als Manganknollen, die lose auf den 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; es 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



The expected technical challenges mainly concern the reliability of the underwater technology over long periods of time and with as little maintenance expenditure as possible. While the basic technical components are already being used in the offshore oil and gas production sector and in the coastal extraction of sand, gravel and alluvial deposits, there has to date been no experience with the long-term application of this technology in the deep sea. Chain drive and Archimedes' screw systems are being discussed for the collector vehicle, while for the vertical transport phase there are two contrasting options, namely the airlift process and the solids pumping technique, both of which have already proved effective in shallow water. As model calculations cannot at present be used to determine the most suitable system, the situation can only be clarified by carrying out on-site trials as part of a programme of pre-pilot mining tests.

Unlike manganese nodules that lie loosely on the deep sea sediments, ferromanganese crusts are firmly attached to the substrate and the biggest technical challenge during the mining operation is to separate the crusts from this bedrock. Another factor is that the crusts are found on the steeply sloping seamounts where there is a very pronounced microtopography. Furthermore, no effective technical means has yet been found for measuring the crust thickness on the sea floor in order to determine the content of the deposits. Gamma emitters and ultrasonics are being discussed as potential options here. Current proposals for separating the crusts from the substrate seem to favour the use of mechanical techniques (milling and cutting), high-pressure water jets and a combination of both systems.

Unlike the situation with marine massive sulphides, no industrially established metallurgical extraction process is yet available either for manganese nodules or ferromanganese crusts. While a combination of pyrometallurgical and hydrometallurgical methods on a semi-industrial scale can produce good extraction rates of 90% at most for copper, cobalt and nickel, these processes entail very high energy and environmental costs and do not permit the recovery of secondary products such as molybdenum and lithium, in the case of manganese nodules, or tellurium and rare earths, in the case of ferromanganese crusts. All current economic feasibility studies suggest that the extraction process, which amounts to about 50% of the total, accounts for the largest share of the investment costs. Any reduction in this investment outlay would bring the marine mining of manganese nodules and ferromanganese crusts much closer to profitability. The development of effective extraction methods for recovering the primary and secondary products, incorporating a modern approach based on microbiology and biomining for example, should become a focus of future research efforts.

## 5 Environmental impact

The impact on the marine environment of any mining of subsea mineral resources poses an additional challenge from a global environmental point of view. Depending on the specific characteristics of the deep sea mining technology that is actually deployed, the main impact of the operation is likely to be felt by the seabed fauna – a factor that has only been partially investigated to date. Critics of the scheme fear that marine mining will produce repercussions on an expansive scale, including high levels of sediment

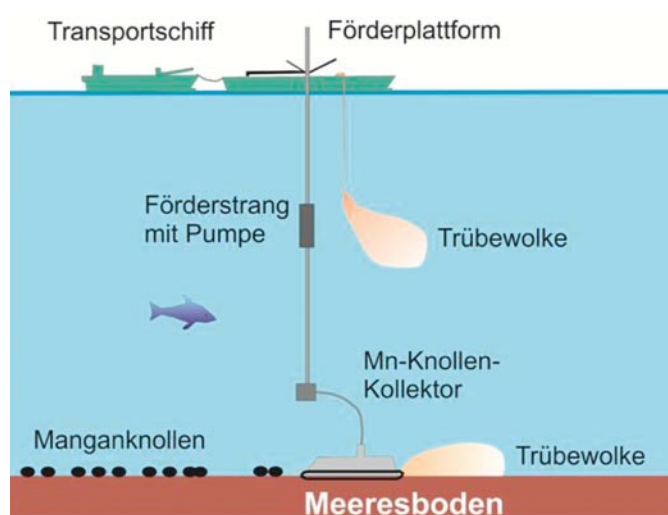


Fig. 6. Concept for mining manganese nodules on the seabed. The depth required for the return of the residue material is still under discussion. A close to the seabed return is the preferred option.

Bild 6. Skizziert Konzept zur Förderung von Manganknollen vom Meeresboden. Die erforderliche Tiefe der Rückleitung der Rückstände wird zurzeit noch diskutiert. Eine bodennahe Rückleitung wird bevorzugt. Source/Quelle: BGR

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 ca. 50% den größten Anteil der Investitionskosten. Eine Reduzierung dieser Investitionskosten 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

Die Auswirkungen eines möglichen zukünftigen Abbaus von marinen mineralischen Rohstoffen auf die Meeresumwelt stellen aus Sicht des globalen Umweltschutzes eine zusätzliche Herausforderung dar. Abhängig von den Spezifika der tatsächlich gefertigten Tiefseebergbautechnologie sind Auswirkungen vor allem auf die Bodenfauna zu erwarten, die bisher nur ansatzweise erforscht ist. Kritiker befürchten eine großräumige Auswirkung eines Unterwasserbergbaus. Dazu zählen Trübewolken am Meeresboden und Beeinträchtigungen der Nahrungskette durch die Einleitung von Reststoffen sowie u. U. 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 Bestim-



suspensions and turbidity close to the ocean floor and damage to the food chain as a result of the introduction of residue material and possibly the release of pollutants from the seafloor and from the production platforms. According to UNCLOS Articles 145 and 209 the ISA is committed to ensuring effective protection of a sustainable marine environment and biodiversity<sup>1</sup>. The need to ensure protection of the environment is emphasised accordingly in all the ISA provisions, guidelines and recommendations (9, 10).

**Manganese nodules:** The potential environmental impact of the mining operations will differ according to the type of mineral resource involved. In the case of manganese nodules the mining area is relatively large at an estimated 200 km<sup>2</sup> per year. Seabed tests to determine the level of damage to the ecosystems on a sub-industrial scale have shown that a functional faunal community can establish itself in a damaged area with almost the same degree of diversity as before within five to ten years (11). However, it is likely that the species composition and distribution will have changed in some way, since organisms that live on the hard substrate of the nodules, or whose lifestyle is affected by this substrate, cannot re-establish themselves in the disturbed areas. The recovery of balanced faunal communities in industrial mining zones will very much depend on the distance to undisturbed areas (12). In a patch-work system of mining zones, this distance will be much smaller than when a single, large-scale extraction area is involved. Furthermore, fine sediment particles will be swirled up by the collectors and dispersed through the marine water in a sediment plume (Figure 6). Modelling work and experiments conducted on the deep sea floor have shown, however, that this sediment plume generally settles down again within a radius of about 2 km (13).

**Massive sulphides:** In the case of massive sulphides the extraction zones currently being discussed are relatively small at less than 1 km<sup>2</sup> per individual area of deposit. Depending on the hydrothermal activity, different types of marine faunal communities will be found in the active and inactive zones. Extremely adaptable and often endemic, chemosynthetic organisms with relatively low diversity live around active hydrothermal sources. In contrast, normal deep sea species tend to inhabit the hard substrate of inactive hydrothermal vents. The loss of living organisms and hard substrate, along with the plume produced by mining activities and the movement of recirculation water, all have a potential environmental impact that needs to be properly examined. In view of the relatively small extraction area compared with manganese nodule fields and the possibility of new vent sites forming quickly in mined, active hydrothermal fields, along with the high degree of adaptability of the organisms involved and the significant variability already present in the natural environmental conditions, it is thought that the overall environmental impact would be fairly low, especially as mining in active hydrothermal fields is not being considered at the moment.

mungen, Richtlinien und Empfehlungen der IMB hervorgehoben (9, 10).

**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 fünf bis zehn Jahren entwickeln kann (11). Jedoch ist grundsätzlich mit einer angepassten Artenzusammensetzung und -verteilung zu rechnen, weil Organismen, die auf dem Harts substrat der Knollen leben oder deren Lebensweise durch das Harts substrat 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 (12). In einem „patch work“ von Abbaufächen ist diese Distanz wesentlich geringer, als in einer einzigen großen Abbaufäche. Zudem werden feine Sedimentpartikel durch die Kollektoren aufgewirbelt und in Form einer Trübewolke im Meer verteilt (Bild 6). Experimente am Meeresboden der Tiefsee und Modellierungsarbeiten haben jedoch gezeigt, dass sich diese Trübe im Umkreis von ca. 2 km größtenteils wieder absetzt (13).

**Massivsulfide:** Bei den Massivsulfiden sind die gegenwärtig diskutierten Abbaufächen mit weniger als 1 km<sup>2</sup> pro Einzelvorkommen relativ klein. Je nach hydrothermalen Aktivität werden in aktiven und inaktiven Zonen sehr unterschiedliche Lebensgemeinschaften gefunden. Extrem anpassungsfähige, oft endemische, chemosynthetische Organismen mit vergleichsweise niedriger Diversität leben an aktiven hydrothermalen Quellen. Demgegenüber besiedeln gewöhnliche Tiefsee-Arten das Hartsubstrat der inaktiven hydrothermalen Austrittsstellen. Lebewesen- und Harts substratverlust sowie die Entstehung von Trübewolken durch Abbau und Rückwassertransport gelten als potentielle Umwelteinwirkungen, die besonders untersucht werden müssen. 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 Krusten:** Für Kobaltkrusten 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 aus

<sup>1</sup> UNCLOS Article 145: Protection of the marine environment.

*Necessary measures shall be taken in accordance with this Convention with respect to activities in the Area to ensure effective protection for the marine environment from harmful effects which may arise from such activities. To this end the Authority shall adopt appropriate rules, regulations and procedures for inter alia ... b) the protection and conservation of the natural resources of the Area and the prevention of damage to the flora and fauna of the marine environment.*

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.*

**Cobalt-rich crusts:** In the case of cobalt-rich crusts the mining area would clearly be larger than that of massive sulphide operations, but smaller than when mining manganese nodules. In addition to the loss of living organisms, the residue material entering the marine water from the mining operations would, as a result of increased currents and the upwelling of water around the seamounts, tend to drift quite a large distance away and in some cases enter the upper water levels.

For all three types of mineral resource it is assumed that any impairment of the environment as a result of mining activities can be minimised with the aid of a comprehensive environment management plan (EMP). A first step in this direction is the development of an environmentally-friendly mining technique that has reached its most advanced stage in the case of manganese nodule extraction. The environmental impact is to be reduced by way of the following measures:

1. the collector is to exert as little pressure as possible on the seabed
2. the nodule collection system will minimize its penetration depth into the sediment as much as possible
3. the amount of sediment whirled up from the seabed will be reduced by technical measures designed to achieve a rapid settlement of this fine-grained material, for example by enclosing the collector vehicle
4. as little sediment and rock dust as possible will be transferred to the floating production platform in order to minimise the amount of material returned to the sea, and
5. the fine-grained residue (tailings) will be returned as close to the seafloor as possible.

Contractual agreements with the ISA require each contracting party to collect environmental reference data throughout the 15-year exploration phase. This information will be used to assess and evaluate the impact of any future mining activities even before any intrusion into the deep sea habitat occurs. The most important element in these environmental investigations is the information gathered on the species composition and population density of the seabed fauna, along with oceanographic and substrate parameters.

The environmental and biodiversity data supplied by the 15 (to date) licensees/applicants for the manganese nodule belts in the Pacific are to be standardised as far as possible and incorporated into an EMP for this highly prospective zone. On the basis of this plan, nine marine protection areas each measuring 160,000 km<sup>2</sup> have been established in the manganese nodule belt, this representing about 30% of the total area. No mining will take place within these protected zones.

The submission of an environmental impact assessment will be a key factor in the decision on any future mining operations. Where substantial evidence indicates the risk of serious harm to the marine environment in a particular case, the Legal and Technical Commission is authorised to recommend to the ISA to disapprove areas for exploitation<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> UNCLOS Article 165: *The Legal and Technical Commission (2) (I)*.  
SRÜ Artikel 165: *Die Rechts- und Fachkommission (2) (I)*.

dem Abbau aufgrund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeit und dem Auftrieb von Wassermassen im Bereich der Seamounts vergleichsweise weit verdriften und ggf. 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 z. Zt. am weitesten fortgeschritten ist. Eine Schonung der Umwelt kann erreicht werden durch

1. einen möglichst geringen Druck des Kollektors auf den Meeresboden,
2. eine geringe Eindringtiefe des Knollen-Aufnahmesystems in das Sediment,
3. das Reduzieren der bodennah entstehenden Sedimentwolke durch technische Maßnahmen, die eine schnelle Absetzung des aufgewirbelten feinkörnigen Sediments bewirken, z.B. durch Ummantelung des Kollektors,
4. einen möglichst geringen Transport von Sedimenten und Gesteinsabrieb zur Förderplattform an der Meeresoberfläche, um deren Rückführung zu minimieren und
5. 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 Abbauaktivitäten 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, aber auch über ozeanographische und Substrat-Parameter.

Die Umwelt- und Biodiversitätsdaten der mittlerweile 15 Lizenznehmer/Antragsteller der Manganknollengürtel im Pazifik sollen soweit wie möglich standardisiert werden und in einen UMP für diese sehr nachgefragte Zone einfließen. Auf der Grundlage dieses Plans wurden im Manganknollengürtel neun jeweils 160.000 km<sup>2</sup> große Meeresschutzgebiete eingerichtet, die zusammen etwa 30% der Gesamtfläche umfassen. Innerhalb dieser Schutzgebiete wird kein Abbau stattfinden.

Ein zentraler Bestandteil bei der Entscheidung über jeden zukünftigen Abbau wird die Vorlage einer Umweltverträglichkeitsstudie (Environmental Impact Assessment) sein. Sofern ernsthafte Gründe in konkreten Fällen schwere Schäden für die Meeresumwelt befürchten lassen, ist die Rechts- und Fachkommission befugt, dem Rat der IMB zu empfehlen, diese Felder von der Ausbeutung auszuschließen<sup>2</sup>.

## 6 Situation in Deutschland

Während der Erkundung der Tiefsee als Quelle mineralischer Rohstoffe in den 1970er und 1980er Jahren waren deutsche Forschungseinrichtungen, wie etwa die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen oder die BGR, aber besonders Firmen wie die damaligen Preussag AG, Hannover, Me-

## 6 Situation in Germany

German research institutions such as the RWTH Aachen University and the BGR, along with private companies including the former Hanover-based Preussag AG and the Frankfurt conglomerate Metallgesellschaft AG, were heavily involved in exploration activities in the 1970s and 1980s that focussed on the deep oceans as a source of mineral resources. The efforts of the industrial sector culminated in 1984 with the application for a mining licence to extract manganese nodules. Over-optimistic expectations, the development of new onshore deposits and the resulting fall in metal prices ultimately prevented these marine mining plans from becoming a reality at the time.

The unexplored potential of deep-ocean resources was not to become the focus of corporate attention again until there was a renewed increase in raw material prices about ten years ago. German interest in this area is now centred mainly around medium-sized businesses that have to pool their resources in order to drive technological development and confront the challenges that lie ahead. The latest position paper from the Federation of German Industries (BDI) in Berlin, which highlights the opportunities that a future deep sea mining industry could have for German companies, has also had a positive impact on the institutional and business view (14).

Additional structural enhancement has come in the form of the DeepSea Mining Alliance (DSMA) that was established in Hamburg in April 2014. Initially intended as a platform for interested German SMEs from the technology industry, the DSMA has now developed into an international group with the inclusion of members from neighbouring European and Asiatic states. A trend towards European or international solutions could help overcome some of the development bottlenecks currently affecting Germany.

## 7 Expected benefits

The general benefits of a deep sea mining industry from today's perspective comprise a number of aspects that are both resource and technology related. These can broadly be summed up as follows:

1. Marine mineral resources represent an additional new source of raw materials that to date has not been included, or not sufficiently considered, when calculating the world's natural resources. This can be attributed to the lack of detailed information in this area, which means that MMR still only constitute a very roughly estimated extension of the known global resource base.
2. A considerable proportion of the MMR presented here lies well offshore and comes under the jurisdiction of the International Seabed Authority. The development and potential commercial exploitation of these deposits will be contracted out on the basis of long-term agreements. This means that they are not subject to the vulnerabilities of resource-rich, sometimes politically unstable nation states. For this reason these mineral resources can make a significant contribution to the diversification of supply sources and to Germany's long-term supply security in this area.
3. Extracting natural resources from deep ocean floors requires innovative technical solutions – ranging from high-resolution exploration techniques and production technology through

tallgesellschaft AG, Frankfurt/M., u. a. stark engagiert. Die Bemühungen der Industrie gipfelten im Jahr 1984 in der Beantragung einer Förderlizenz für Manganknollen. Überhöhte Erwartungen, die Erschließung neuer Landlagerstätten und der damit verbundene Preisverfall der Metallrohstoffe verhinderten damals letztlich eine Umsetzung der Pläne.

Erst mit dem erneuten Anstieg der Rohstoffpreise vor gut zehn Jahren gelangte das unerforschte Potential tiefmariner Rohstoffe wieder in den Fokus der gesellschaftlichen Anteilnahme. Die interessierte deutsche Industrie ist heute allerdings vorwiegend mittelständisch und muss ihre Interessen bündeln, um die Entwicklung technologisch voranzubringen und die Herausforderungen zu stemmen. Positiv wirkt dabei ein aktuelles Positionspapier des Bundesverbands der Deutschen Industrie e. V. (BDI), Berlin, welches die Chancen eines zukünftigen Tiefseebergbaus für die deutsche Industrie herausstellt (14).

Ein weiterer strukturfördernder Schritt ist die Gründung der DeepSea Mining Alliance (DSMA) im April 2014 in Hamburg: Zunächst als Plattform interessierter mittelständischer deutscher Unternehmen aus der Technologiebranche gestartet, ist die Basis mittlerweile durch Mitglieder aus benachbarten europäischen sowie asiatischen Staaten international geworden. Ein Trend zu europäischen oder internationalen Lösungen könnte vorhandene Engpässe in Deutschland überwinden helfen.

## 7 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:

1. Marine mineralische Rohstoffvorkommen stellen neue zusätzliche Quellen dar, die bisher in Rohstoffberechnungen 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.
2. 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 substantiellen Beitrag zur Diversifizierung der Bezugsquellen und zur langfristigen Versorgungssicherheit unseres Landes leisten.
3. 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 sehen.



to efficient metallurgical processing. This means developing environmentally friendly solutions, including for example production systems capable of operating at maximum reliability in remote ocean locations. This will call for outstanding engineering skills and technical know-how. For a technology and export oriented country like Germany this must be seen as an opportunity to shape a new economic future.

## 8 Conclusions

Deep sea mining is not yet a reality but it certainly represents a very appealing future business field. However, the strategic role of deep sea deposits awaiting exploitation is to supplement and extend the known land-based resources and not to substitute conventional raw materials mining as we know it today. While we can still do no more than estimate the scale of the marine mineral reserves, it appears that they are comparable to many onshore deposits in terms of metal enrichment and development costs, and in certain individual cases may even be superior. As well as supplying a range of high-quality minerals, such a deep sea mining industry will provide huge opportunities for an export oriented, high-tech country like Germany. And in the politically unstable world in which we live it is a particular relief to know that when it comes to resource exploitation and utilisation a large part of the world's oceans are subject to a standard set of rules under international supervision and control.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) ISA (International Seabed Authority) (2010): Development of geological models for the Clarion-Clipperton Zone polymetallic nodule deposits. ISA technical Study No. 6. Kingston (Jamaica). 105 pp.
- (2) Hein, J.R., Conrad, T.A., Staudigel, H. (2010): Seamount Mineral Deposits. A source of rare metals for high-technology industries. *Oceanography* 23/1, pp. 184 - 189.
- (3) Hein, J.R., Mizell, K., Koschinsky, A., Conrad, T.A. (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, pp. 1 - 14.
- (4) Hannington, M.D., Jonasson, I.R., Herzig, P.M., Petersen, S. (2000): Physical and chemical processes of seafloor mineralization at mid-ocean ridges. In: S. Humphris et al. (Eds): *Seafloor hydrothermal systems: physical, chemical, biological, and geological interactions*. AGU Geophysical Monograph 91. Washington DC, pp: 115 – 157.
- (5) Hannington, M.D., de Ronde, C.E.J., Petersen, S. (2005): Sea-Floor Tectonics and Submarine Hydrothermal Systems. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, pp. 111 – 141.
- (6) Jenisch, U. (2014): Tiefseebergbau in der vorkommerziellen Phase. *Schiff & Hafen*, Nr. 11, S. 36 - 39.
- (7) Johnson, C. J. and Otto, J. M. (1986): Manganese nodule project economics. Factors relating to the Pacific Region, *Resource Policy*, 12(1), pp. 17 - 28.
- (8) Yamazaki, T. (2008): Model mining units of the 20th century and the economies. Proc. of The Seventh (2008) ISOPE Ocean Mining Symposium, Chennai, pp. 1 - 9.
- (9) Jenisch, U. (2010): Renaissance des Meeresbodens. Mineralische Rohstoffe und Seerecht, *NordÖr Zeitschrift für öffentliches Recht in Norddeutschland*, Teil 1: Heft 10/2010, S. 373 - 382, Teil 2: Heft 11/2010, S. 429 - 433.
- (10) Jenisch, U. (2013): Tiefseebergbau – Lizenzvergabe und Umweltschutz. *Natur und Recht*, Nr. 35, S. 841 – 854, Springer Verlag, DOI: 10.1007/s10357-013-2554-7.
- (11) Thiel, H., Schriever, G., Foell, E. (2005): Polymetallic Nodule Mining, Waste Disposal, and Species Extinction at the Abyssal Seafloor. *Marine Georesources and Geotechnology* 23, pp. 209 - 220.
- (12) Thiel, H., Borowski, C., Koschinsky, A., Martinez-Arbizu, P., Schriever, G. (2012): Umweltschutzaspekte beim Manganknollenabbau. *Schiff & Hafen* 6, S. 86 - 88.
- (13) Jankowski, J.A., Zielke, W. (2001): The mesoscale sediment transport due to technical activities in the deep sea. *Deep-Sea Research II* 48, pp. 3487 - 3521.
- (14) BDI (Stollberger/Wachter) (2014): Die Chancen des Tiefseebergbaus für Deutschlands Rolle im Wettbewerb um Rohstoffe, Positionspapier, 10 S.

## 8 Fazit

Einen Tiefseebergbau gibt es bisher noch nicht, er stellt aber ein durchaus attraktives Zukunftsfeld dar. Dabei liegt die Rolle von zu erschließenden Tiefseelagerstätten 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 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.

## Authors / Autoren

Dr. Michael Wiedicke, Arbeitsbereichsleiter Meeresgeologie/Tiefseebergbau, Dr. Thomas Kuhn, marine Lagerstättenmodellierung, Dr. Carsten Rühlemann, Leiter Exploration von Manganknollen, Dr. Annemiek Vink, umweltbezogene Untersuchungen, Dr. Ulrich Schwarz-Schampera, Leiter Exploration mariner Sulfide, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover