

# Tiefseebergbau: Ein Umweltproblem?

Ein Beitrag von *LUISE HEINRICH*

Technischer Fortschritt und ein steigender Bedarf an Metallen aufgrund anhaltender Trends (z. B. Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, Digitalisierung, Ausbau erneuerbarer Energien und Umstieg auf E-Mobilität) haben das Thema »Tiefseebergbau« nach wechselnden Phasen des Interesses und Desinteresses wieder in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Während Vertreter der Industrie darin in erster Linie eine Chance sehen, lehnen Nichtregierungsorganisationen einen derartigen Eingriff in die Natur oft kategorisch ab. Tatsächlich wäre ein kommerzieller Abbau mariner mineralischer Rohstoffe mit erheblichen, weitgehend unwiderruflichen Umweltfolgen verbunden, darunter die großflächige Zerstörung von Habitat und die mögliche Freisetzung potenziell toxischer Metalle am Meeresboden, die Entstehung von Sedimentfahnen in der Wassersäule und der Ausstoß von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen über der Wasseroberfläche. Gleichzeitig vermeidet er einige der katastrophalsten Auswirkungen des Bergbaus an Land und sollte daher nicht direkt von der Hand gewiesen werden. Der Artikel bietet einen umfassenden Überblick über den Abbau von Manganknollen, Eisenmangankrusten und Massivsulfiden sowie die damit einhergehenden Umweltfolgen.

Tiefseebergbau | Rohstoffe | Umweltfolgen | kritische Metalle | Meeresumwelt  
 deep sea mining | raw materials | environmental impact | critical metals | marine environment

Technical progress and a growing demand for metals due to continuing trends (e.g. population and economic growth, digitalisation, expansion of renewable energies and switch to e-mobility) have brought the topic of »deep sea mining« back into focus after alternating phases of interest and disinterest. While representatives of the industry primarily see this as an opportunity, non-governmental organisations often categorically reject such an intervention in nature. In fact, commercial mining of marine mineral resources would entail considerable, largely irreversible environmental consequences, including the large-scale destruction of habitats and the possible release of potentially toxic metals on the seabed, the formation of sediment plumes in the water column and the emission of greenhouse gases and other pollutants above the water surface. At the same time, it avoids some of the most catastrophic effects of land-based mining and should therefore not be dismissed. The article provides a comprehensive overview of the mining of manganese nodules, iron manganese crusts and massive sulfides and the associated environmental impacts.

## Autorin

Luise Heinrich ist Doktorandin am Department of Physics and Earth Sciences der Jacobs University Bremen.

[l.heinrich@jacobs-university.de](mailto:l.heinrich@jacobs-university.de)

## 1 Einleitung

Im Jahr 1873 entdeckten die Teilnehmer einer Expedition des britischen Forschungsschiffes *HMS Challenger* eine Vielzahl seltsamer schwarzbrauner Klumpen am Meeresgrund, von denen sie einige zu Forschungszwecken an die Oberfläche holten. Die Wissenschaftler an Bord des Schiffes erkannten schnell, dass die mehreren Zentimeter großen, kartoffelförmigen Brocken größtenteils aus Manganoxid bestanden und darüber hinaus noch erhebliche Mengen anderer Metalle enthielten. Da der Fokus der *Challenger*-Expedition in erster Linie jedoch auf der Erforschung der Temperatur, der Topografie und der Strömungsverhältnisse in der Tiefsee lag, verschwanden die während der Fahrt gesammelten Manganknollen zunächst für mehrere Jahrzehnte als »mineralogische Kuriositäten« in Museen und Gesteinssammlungen, bevor man Mitte des 20. Jahrhunderts ihren wirtschaftlichen Wert erkannte (Sparenberg 2019). Eine bedeutende Rolle spielte hierbei der amerikanische Bergbauingenieur John L. Mero, der Manganknollen in

seinem 1965 erschienen Buch *The Mineral Resources of the Sea* aufgrund ihres hohen Metallgehalts und ihrer gewaltigen Vorkommen auf dem Grund fast aller Ozeane als eine nahezu unerschöpfliche Ressource darstellte (Mero 1965). Obwohl sich bald herausstellte, dass Meros Berechnungen auf einer Reihe falscher Annahmen basierten, weckten sie doch das Interesse mehrerer Nationen, die sich mit der Möglichkeit eines großangelegten Abbaus dieses Rohstoffes beschäftigten. Dabei ging es nicht nur um wirtschaftliche Interessen, sondern auch um geostrategische Überlegungen, da ein kommerzieller Tiefseebergbau es besonders Ländern ohne eigene metallische Ressourcen ermöglichen würde, ihre Abhängigkeit von den Exporten anderer Länder zu verringern. Auf eine Phase richtiggehender Goldgräberstimmung in den 1960er- und 1970er-Jahren, während welcher die Ressourcen am Meeresgrund ausgiebig erforscht, ihr wirtschaftliches Potenzial geschätzt und Abbautechnologie entwickelt wurde, folgte jedoch eine Phase der Ernüchterung, als man feststellte, dass

der Abbau mineralischer Ressourcen in der Tiefsee aufgrund der dort vorherrschenden Bedingungen doch nicht so einfach zu bewerkstelligen war und sich wirtschaftlich aufgrund fallender Metallpreise auch nicht rechnete (Sparenberg 2019). In den letzten zwei Jahrzehnten haben zwei Trends das Interesse an einem kommerziellen Tiefseebergbau jedoch wieder neu entfacht: die zunehmende Digitalisierung und der Kampf gegen den Klimawandel. Sowohl Computer und Smartphones als auch die Technologien für erneuerbare Energien und elektrische Fahrzeuge benötigen in der Herstellung große Mengen an Metallen (Hein et al. 2015). Bisher werden diese hauptsächlich über den Landbergbau gewonnen. Abnehmende Metallgehalte erfordern jedoch die horizontale sowie vertikale Ausdehnung bestehender Abbaugelände oder die Schaffung neuer Bergwerke in immer entfernteren Gegenden (Mudd 2020). Ein Abbau mineralischer Ressourcen in der Tiefsee rückt daher zunehmend in den Fokus. Aber wie sähe so ein Abbau aus, wo würde er stattfinden und welche Folgen hätte ein kommerzieller Tiefseebergbau für die Umwelt? Die folgenden Ausführungen basieren unter anderem auf einem Review-Artikel, der neben den Umweltfolgen des Tiefseebergbaus auch soziale, rechtliche und wirtschaftliche Aspekte diskutiert (Koschinsky et al. 2018). In weiteren Artikeln dieser Ausgabe wird der Tiefseebergbau hinsichtlich seiner wirtschaftlichen Bedeutung für Technologie und Industrie beleuchtet, des Weiteren wird der rechtliche Rahmen eines kommerziellen Abbaus diskutiert.

## 2 Marine mineralische Ressourcen

Neben den 1873 entdeckten Manganknollen interessieren sich Wissenschaft und Wirtschaft heute noch für zwei weitere in den 1970ern und 1980ern entdeckte Lagerstättentypen: Eisenmangankrusten und Massivsulfide. Alle drei enthalten signifikante Mengen wirtschaftlich relevanter Metalle, unterscheiden sich aber zum Teil erheblich bezüglich ihrer Entstehung, Form, Zusammensetzung und ökologischem Umfeld.

Bei Manganknollen handelt es sich um mehrere Zentimeter große kartoffelförmige Klumpen. Manganknollen sind über einen Zeitraum von mehreren Millionen Jahren durch die Ausfällung von im Meerwasser und im Porenwasser des Sediments gelöster Metalle entstanden, die sich nach und nach an einer festen Struktur, beispielsweise einem Haifischzahn oder einem Stück Muschelschale, abgelagert haben. Sie bestehen aus konzentrisch angeordneten Eisen- und Manganoxidlagen und enthalten größere Mengen anderer Metalle, wie z. B. Nickel, Kobalt und Kupfer, denen das primäre wirtschaftliche Interesse gilt. Darüber hinaus enthalten sie spezielle Metalle, die zunehmend an Bedeutung gewinnen, wie Molybdän, Platin und Seltene Erden (Hein und Koschinsky

2014). Manganknollen kommen hauptsächlich auf Tiefseeebenen in 3500 bis 6000 m Wassertiefe vor (Abb. 1), wo sie lose in und auf der obersten Sedimentschicht zu finden sind. Von besonderem wirtschaftlichen Interesse sind aufgrund einer hohen Belegungsdichte an Knollen mit einem ausreichend hohen Metallgehalt und einer weitgehend ebenen Topografie die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) im Zentralpazifik zwischen Mexiko und Hawaii, das Peru-Becken, das Penrhyn-Becken in der Nähe der Cookinseln und der zentrale Indische Ozean (Petersen et al. 2016) (Abb. 2). Konzepte für den kommerziellen Abbau von Manganknollen sehen die Verwendung von ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen vor, welche die Manganknollen am Meeresboden aufsammeln und größere Stücke zerkleinern. Anschließend würden diese durch ein Rohr in Richtung Wasseroberfläche gepumpt und an Bord eines sich über der Abbaufäche befindlichen Schiffes von überschüssigem Wasser und Sediment befreit. Das Sediment-Wasser-Gemisch wird ins Meer zurückgepumpt und die Manganknollen werden an der Luft getrocknet und gelagert, bis sie von Transportschiffen abgeholt und zur weiteren Verarbeitung an Land gebracht werden (Blue Mining 2014; SPC 2013b). Die meisten Konzepte sehen einen jährlichen Abbau von 1,5 bis 3 Millionen Trockentonnen pro Abbaufäche vor (Sharma 2011).

Eisenmangankrusten bestehen ähnlich wie Manganknollen aus alternierenden Mangan- und Eisenoxidlagen. Im Gegensatz zu den kugelförmigen Manganknollen bilden sie jedoch flache Lagen an den Hängen von Tiefseebergen in Wassertiefen zwischen 800 und 2500 m (Halbach et al. 1982; Hein und Koschinsky 2014) (Abb. 1). Sie

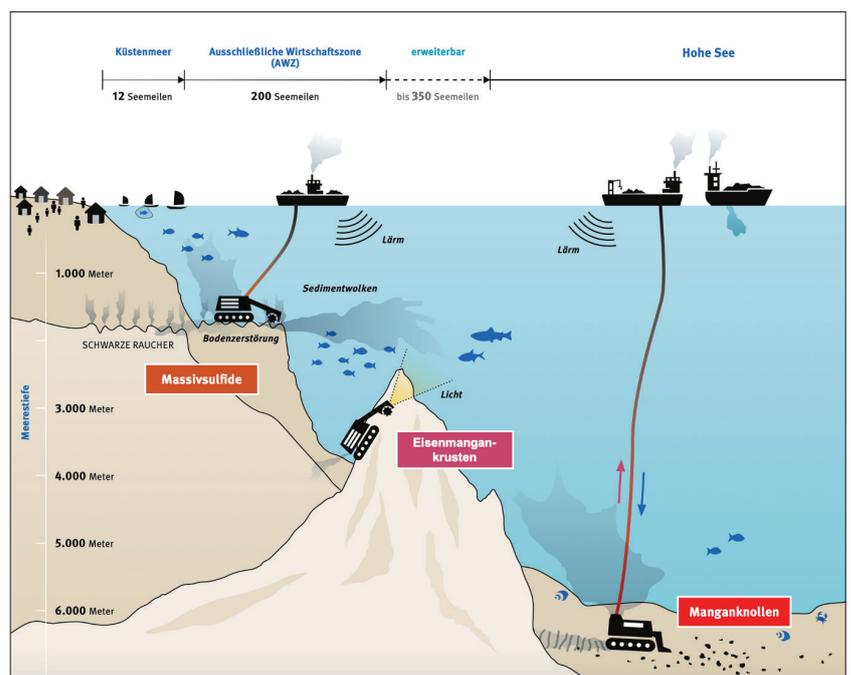


Abb. 1: Nicht maßstabsgetreue schematische Darstellung des kommerziellen Tiefseebergbaus und der damit verbundenen Umweltfolgen

Quelle: Miserecor 2015

enthalten ebenfalls eine beachtliche Menge wirtschaftlich relevanter Metalle, wie z. B. Nickel, Kupfer, Kobalt, Molybdän, Platin und Seltene Erden. Von besonderem Interesse ist die zwischen den Hawaiianischen Inseln und dem Marianengraben gelegene Prime Crust Zone (PCZ), in der sich Eisenmangankrusten mit besonders hohen Metallgehalten befinden (Abb. 2). Aufgrund ihrer festen Verbindung mit dem darunterliegenden Gestein sowie ihrer Schräglage am Hang gilt der Abbau von Eisenmangankrusten als besonders schwierig (SPC 2013a). Bis auf ein paar wenige Ideen für den Einsatz mechanischer Schneidegeräte oder Wasserstrahlensysteme gibt es zurzeit noch keine konkreten Konzepte für einen großangelegten Abbau bei diesem Lagerstättentyp.

Massivsulfide sind massive, größtenteils aus Metall-Schwefel-Verbindungen bestehende Ablagerungen am Meeresboden. Sie entstehen in geologisch aktiven Regionen, in denen heiße, saure, metall- und schwefelhaltige Hydrothermalfluide aus dem Untergrund ins Meer strömen. An diesen Stellen dringt Meerwasser tief in den Untergrund ein, wird dort auf mehrere hundert Grad erhitzt, und löst Schwefel und Metalle aus dem umgebenden Gestein. Das heiße Fluid steigt aufgrund seiner geringeren Dichte auf und fließt Richtung Meeresboden zurück, wo es sehr schnell abkühlt. Wo die heißen Fluide und das kalte sauerstoffreiche Umgebungswasser aufeinandertreffen, verbinden sich die gelösten Metalle mit dem Schwefel zu Sulfiden und bilden im Untergrund Massivsulfid-Lagerstätten und am Meeresboden meterhohe Erzschorne (Smoker), aus denen heiße Fluide und partikulärer schwarzer »Rauch« austritt, der sich im Umfeld der Hydrothermalquellen ablagert. Die Wissenschaft schätzt, dass es weltweit zwischen 500 und 1000 größere Massivsulfidvorkommen gibt, von denen bisher knapp über 300 entdeckt wurden (Francheteau et al. 1979; Fuchs et al. 2019; SPC 2013c). Massivsulfidvorkommen haben einen hohen Eisengehalt und enthalten außerdem große Mengen Kupfer, Zink,

Silber und Gold. Sie sind in ihrer Ausdehnung zwar deutlich kleiner als Felder von Manganknollen und Eisenmangankrusten, können sich aber unregelmäßig mehrere hundert Meter in den Tiefseeböden hinein erstrecken. Obwohl dies eine zuverlässige Einschätzung ihres Rohstoffpotenzials sowie ihren Abbau erheblich erschwert, wurde lange Zeit davon ausgegangen, dass Massivsulfide aufgrund ihrer oft küsten- oder inselnahen Lage und geringen Wassertiefe (Abb. 1) als erste abgebaut werden würden. Vorreiter auf diesem Gebiet war für längere Zeit die kanadische Firma Nautilus Minerals, die als erstes Unternehmen Massivsulfide in einem Gebiet namens Solwara 1 vor der Küste Papua-Neuguineas abbauen wollte. Aufgrund anhaltender finanzieller Schwierigkeiten sah sich das Unternehmen allerdings im vergangenen Jahr dazu gezwungen, trotz fertigentwickelter Geräte und eines eigens für diesen Zweck gebauten Abbauschiffes Insolvenz anzumelden. Das Abbaukonzept von Nautilus Minerals sah den Einsatz verschiedener unbemannter Schneide- und Sammelfahrzeuge vor, die das Gestein am Boden aufbrechen und kleinere Stücke einsammeln. Anschließend sollte das Material durch ein Rohr an Bord eines Abbauschiffes gepumpt werden, wo es zwischengelagert und schließlich von Transportschiffen zur metallurgischen Verarbeitung an Land gebracht worden wäre. Neben Papua-Neuguinea interessiert sich vor allem Japan für einen Abbau von Massivsulfiden in den Küstengewässern des Landes. In diesem Zusammenhang berichtete das japanische Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI) im Jahr 2017 von einem erfolgreich durchgeführten Pilottest in der Nähe des Okinawa-Trog.

### 3 Umweltfolgen eines kommerziellen Tiefseebergbaus

Ein großflächiger Abbau mariner mineralischer Ressourcen wäre mit erheblichen Umweltfolgen verbunden, die jedoch für jeden Lagerstättentyp unterschiedlich ausfallen würden. Probleme entstehen dabei hauptsächlich am Meeresboden, aber auch in der Wassersäule und oberhalb der Wasseroberfläche.

#### Meeresboden

In der Umgebung von Manganknollenfeldern ist es dunkel und kalt, es herrscht ein enormer Druck und die Strömungen am Meeresboden sind meist sehr langsam. Die oberen 10 cm des Sediments werden von sesshaften Organismen bewohnt, die die Manganknollen als festes Substrat nutzen. Darüber hinaus gibt es einige mobile Arten, die in und auf dem weichen Tiefseesediment leben. Die Bewohner der Tiefsee betreiben aufgrund der vorherrschenden Dunkelheit keine Fotosynthese, sondern ernähren sich von organischen Partikeln, die von der Meeresoberfläche herabsinken. Ein

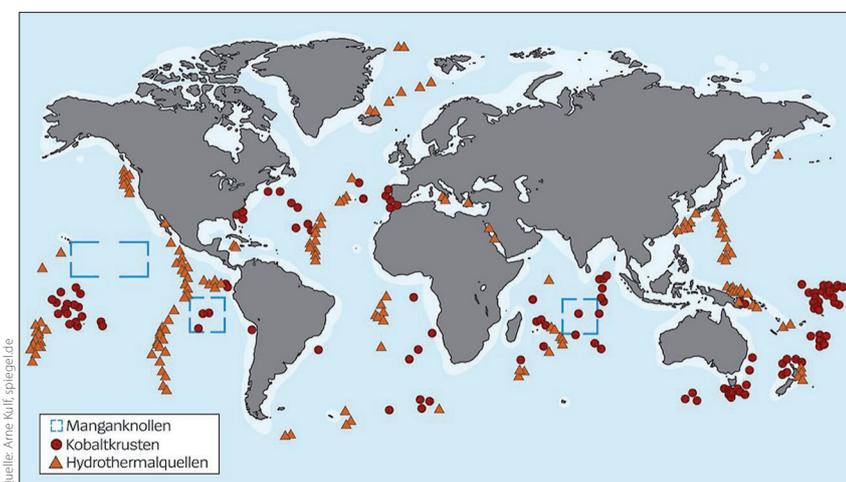


Abb. 2: Rohstoffvorkommen in der Tiefsee

kommerzieller Abbau von Manganknollen würde den Lebensraum dieser Organismen zerstören. Sesshafte Organismen würden durch die großflächige Entfernung von Manganknollen ihren festen Untergrund dauerhaft verlieren, während mobile Organismen durch aufgewirbeltes und anschließend wieder absinkendes Sediment begraben werden könnten. Auch eine Verdichtung des Sediments durch Unterwasserfahrzeuge wäre denkbar und könnte zur Zerstörung des Habitats beitragen. Besonders betroffen wären dabei sogenannte Filtrierer, die ihre Nahrung aus dem Meerwasser herausfiltern und deshalb auf einen sedimentfreien Wasserfluss angewiesen sind (SPC 2013b).

Die Umweltfolgen eines kommerziellen Manganknollenabbaus werden seit mehreren Jahrzehnten von verschiedenen Ländern sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene erforscht. Zu den prominentesten Beispielen für Forschungsmissionen zählen in dieser Hinsicht die Deep Ocean Mining Environment Study (DOMES, 1972–1981, USA), die die Umweltfolgen zweier von der Ocean Mining Inc. (OMI) und den Ocean Mining Associates (OMA) ausgeführter Pilotversuche analysierte und überwachte, das Japan Deep-Sea Impact Experiment, das sich besonders auf die Folgen einer Aufwirbelung des Sediments für das Tiefseeökosystem konzentrierte, und das europäische MIDAS-Projekt (2013–2016), das sich allgemein mit den Folgen eines kommerziellen Abbaus verschiedener mariner Ressourcen beschäftigte. Eine besondere Bedeutung kommt außerdem dem deutschen Disturbance and Re-colonization Experiment (DISCOL) zu, das im Jahr 1989 den kommerziellen Abbau von Manganknollen im Peru-Becken durch systematisches Pflügen einer 11 km<sup>2</sup> großen Fläche simulierte, um die ökologischen Folgen dieser Aktivität sowie die Wiederbesiedlung des betroffenen Gebiets innerhalb von sieben Jahren zu untersuchen. Mehrere Forschungsfahrten in die Region, unter anderem im Rahmen der Joint Programming Initiative Healthy and Productive Seas and Oceans (JPI Oceans – Mining Impact, 2015–2017) in den folgenden Jahrzehnten zeigten, dass die 1989 verursachten Spuren auch viele Jahre später noch gut sichtbar sind. Dies ist nicht überraschend, da die biologischen und biogeochemischen Prozesse in der Tiefsee sehr langsam ablaufen. Die Sedimentationsrate beträgt in dieser Tiefe beispielsweise nur einen Millimeter pro tausend Jahre. Untersuchungen mit Hilfe von Videoaufnahmen in Gebieten, in denen der Abbau von Manganknollen simuliert wurde, bestätigten, dass die Wiederbesiedlung der zuvor zerstörten Gebiete durch mobile Organismen sehr gering und die durch sesshafte Organismen wegen der dauerhaften Entfernung der Manganknollen nahezu unmöglich ist (Vanreusel et al. 2016).

Eisenmangankrusten werden weitestgehend von sesshaften Organismen wie Korallen, Anemo-

nen und Schwämmen besiedelt, wobei die Zusammensetzung der Artengemeinschaft von verschiedenen Faktoren, wie Wassertiefe, -temperatur und Strömung, beeinflusst wird (Clark et al. 2010). Die dauerhafte Entfernung der Eisenmangankrusten würde dementsprechend hauptsächlich zu einem großflächigen Verlust von Lebensraum führen. Ähnlich wie bei Manganknollen wird die Wiederbesiedlung des Gebiets sehr lange dauern und die Zusammensetzung der Artengemeinschaft wird sich erheblich von der ursprünglichen Zusammensetzung unterscheiden, da die ansässigen Arten oft langlebig sind und sich nur sehr langsam fortpflanzen. Daher ist es wahrscheinlich, dass die zerstörten Flächen zunächst von sich schneller vermehrenden Arten dominiert werden würden. An Orten, wo Eisenmangankrusten mit Sediment bedeckt sind, könnte es ebenfalls zur Aufwirbelung von Sediment kommen, das anschließend Organismen in der Nähe des Abbaubereiches unter sich begraben würde. Auch hier wären besonders die Filtrierer betroffen (SPC 2013a).

In der Umgebung der Massivsulfide werden zwei Arten von Ökosystemen unterschieden: Während die aktiven Hydrothermalquellen, also die aktiven Raucher, von einer Reihe endemischer, das heißt speziell angepasster Arten bewohnt werden, unterscheidet sich das Ökosystem im Umfeld inaktiver Quellen nur unwesentlich von dem der umgebenden Tiefsee. Die Fauna, darunter unter anderem Schnecken, Muscheln, Garnelen und Röhrenwürmer, in direkter Umgebung der Raucher zeichnet sich durch eine hohe Biomasse, aber geringe Diversität aus. Viele der dort lebenden Arten sind auf symbiotische Beziehungen mit chemotrophen Mikroorganismen angewiesen, um ihr Überleben zu sichern. Die periphere Fauna, also die Arten, die sich in der weiteren Umgebung oder in der Nähe inaktiver Raucher ansiedeln, besteht wie im Falle der Eisenmangankrusten hauptsächlich aus Schwämmen, Korallen und Anemonen (Van Dover 2011, 2004). Ähnlich wie bei den anderen beiden Lagerstättentypen, würde der Abbau von Massivsulfiden mit dem Verlust von Lebensraum einhergehen, was vor allem sesshafte Organismen beeinträchtigen würde. Aktive Hydrothermalquellen wachsen und kollabieren allerdings auch ohne menschliches Zutun nach Monaten bis Jahrhunderten. Die Wiederbesiedlung der Umgebung nach einer Zerstörung würde aus diesem Grund vermutlich deutlich schneller vonstatten gehen, als es bei den anderen beiden Lagerstättentypen der Fall wäre. Da die Folgen eines künstlichen Eingriffs in das weitläufige Netz aktiver Hydrothermalquellen jedoch unvorhersehbare Folgen sowohl an der Abbaustelle als auch in weiterer Entfernung haben könnte, wird sich der kommerzielle Abbau von Massivsulfiden voraussichtlich auf inaktive Systeme beschränken. In diesen Gebieten wären die Folgen eines Abbaus allerdings deutlich lang-

wieriger. Da die von einem Abbau betroffenen Gebiete jedoch verhältnismäßig klein wären, wären die Umweltwirkungen des Abbaus sowohl auf zeitlicher als auch auf räumlicher Ebene begrenzt (SPC 2013c).

Neben biologischen Auswirkungen kann der Tiefseebergbau auch zu geochemischen Veränderungen an der Grenze zwischen Sediment und Bodenwasser kommen (Koschinsky et al. 2001). Experimentelle Studien deuten beispielsweise auf eine mögliche Freisetzung potenziell toxischer Metalle aus Sediment und Porenwasser als Konsequenz des Manganknollenabbaus hin. Das Ausmaß dieser Umweltfolge hängt jedoch stark davon ab, bis zu welcher Tiefe Sauerstoff in das Tiefseesediment eindringt. Da sich Mangan und andere Metalle in einem suboxischen Milieu in Lösung befinden, würde es bei einer besonders tiefen Störung des Sediments durch Unterwasserfahrzeuge zu einer messbaren Freisetzung der Metalle ins Bodenwasser kommen (Fritsche et al. 2001). Die Wissenschaft geht allerdings davon aus, dass die Sauerstoffeindringtiefe in der Clarion-Clipperton-Zone mit 1,5 m ausreichend tief ist, sodass Mangan- und Metalloxide in fester Form vorliegen und das Problem in dieser Region somit keine Rolle spielen wird (Mewes et al. 2014). Anders sähe die Situation im Peru-Becken aus, wo die Sauerstoffeindringtiefe lediglich 5 bis 10 cm beträgt (Fritsche et al. 2001). Ein kommerzieller Abbau von Manganknollen im Peru-Becken in naher Zukunft gilt derzeit jedoch als unwahrscheinlich. Der Abbau von Eisenmangankrusten wäre vermutlich nicht mit einer Freisetzung toxischer Metalle verbunden, solange er nicht in der Sauerstoff-Minimum-Zone (ca. 500 bis 1000 m Wassertiefe) stattfindet. Da sich Eisenmangankrusten allerdings nur in sauerstoffreichem Wasser bilden, ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fall eintritt, jedoch äußerst gering (Koschinsky und Halbach 1995). Im Umfeld von Massivsulfiden würden sich die ökologischen Folgen einer Freisetzung toxischer Metalle voraussichtlich in Grenzen halten, da die dort lebenden Organismen die Freisetzung der schwefel- und metallhaltigen Hydrothermalfluide gewohnt und dementsprechend angepasst sind (Koschinsky 2016).

### Wassersäule

Beim Abbau mariner mineralischer Ressourcen kann es während des Betriebs der Unterwasserfahrzeuge, beim Transport der mineralischen Rohstoffe vom Meeresboden zur Wasseroberfläche und bei der Rückführung des Waschwassers zur Entstehung von Sedimentfahnen kommen. Je nachdem, wo sich diese Sedimentwolken in der Wassersäule bilden, könnten sie die Lichtdurchlässigkeit des Wassers reduzieren und somit die primäre Produktivität in den oberen Wasserschichten direkt und die Nährstoffversorgung in den tieferliegenden Lagen indirekt beeinflussen. Außerdem

könnten sie eine örtliche Verringerung des Sauerstoffgehalts zur Folge haben. Darüber hinaus kann sich das Wasser-Sediment-Gemisch, das beim Abbau mit den Knollen an Bord des Schiffes geholt und anschließend in die Wassersäule zurückgepumpt wird, bezüglich seines Salzgehaltes, seiner Metall- und Nährstoffkonzentrationen sowie seiner Temperatur von dem Wasser in der Umgebung des Einlasses unterscheiden, was die dort lebenden Organismen negativ beeinflussen könnte. Auch wenn es möglich ist, dass die Sedimentpartikel in der Wassersäule manchen Organismen auch als zusätzliche Nährstoffquelle dienen könnten, wird dazu geraten, das Wasser möglichst dorthin zurückzupumpen, wo es entnommen wurde, also in die Nähe des Meeresbodens. Da die Sedimentfahnen mit den Meeresströmungen treiben würden, wurde für lange Zeit angenommen, dass sich die Partikel über weite Distanzen ausbreiten und negative Folgen daher auch weit außerhalb des Abbaugebiets auftreten könnten. Jüngere Experimente und Modellrechnungen deuten jedoch darauf hin, dass die Ausbreitung der Sedimentwolke durch die Agglomeration und das damit verbundene Absinken der Partikel vermutlich geringer ist. Daran, dass die betroffene Fläche die Ausmaße des eigentlichen Abbaugebietes übersteigen wird, besteht dennoch kein Zweifel (Gillard et al. 2019).

Durch den Betrieb der Unterwasserfahrzeuge, der Pumpen und des Abbauschiffes an der Oberfläche könnte es in der gesamten Wassersäule auch zu einer Belastung der Organismen durch Licht und Lärm kommen. Über die genauen Ausmaße und Folgen dieses Problems ist bisher allerdings nur wenig bekannt (Weaver et al. 2018).

### Atmosphäre

Der Abbau mariner mineralischer Ressourcen wird mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden sein. Da sich die Abbaugebiete weit entfernt jeglicher Küsten befinden werden, wird davon ausgegangen, dass die für den Abbau benötigte Energie durch die Verbrennung von Schweröl oder Schiffsdiesel an Bord der Abbauschiffe bereitgestellt werden wird. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe wird den Ausstoß von Treibhausgasen, wie Kohlendioxid, Methan und Distickstoffmonoxid, sowie die Freisetzung von anderen Schadstoffen, wie Schwefel- und Stickoxiden, Kohlenmonoxid, flüchtigen organischen Verbindungen und Feinstaub, zur Folge haben und damit zum globalen Klimawandel beitragen (Heinrich et al. 2020).

## 4 Öffentliche Wahrnehmung

Während das Interesse an einem kommerziellen Tiefseebergbau anfänglich auf dem Glauben an den technologischen Fortschritt und an die Unterwerfung der Umwelt zur Förderung des menschlichen Wohlstands basierte, wich das

bedingungslose Streben nach Fortschritt und Wachstum in der Bevölkerung Ende der 1970er-Jahre einer zunehmenden Skepsis und einem wachsenden Umweltbewusstsein. Aus diesem Grund gewann die Umweltbegleitforschung besonders seit den 1980er-Jahren zunehmend an Stellenwert. In der Öffentlichkeit fand das Thema »Tiefseebergbau« über lange Zeit hinweg allerdings kaum Beachtung (Sparenberg 2019). Dies änderte sich erst in den letzten Jahren, seit der Tiefseebergbau aufgrund der steigenden Nachfrage nach Metallen und des anhaltenden technologischen Fortschritts auf dem Gebiet eine zunehmende mediale Aufmerksamkeit erhält. Dabei werden besonders kritische Stimmen laut. Im Moment stehen vor allem Meeresbiologen, Nichtregierungsorganisationen und Teile der Bevölkerung dem Tiefseebergbau aufgrund seiner ausgeprägten Umweltfolgen und der noch ausgeprägten Wissenslücken kritisch gegenüber. Insbesondere küstennahe Gemeinden, die in der Nähe möglicher Abbaugelände leben, wie Solwara 1 vor der Küste Papua-Neuguineas, fürchten, dass sich der Abbau mariner mineralischer Ressourcen negativ auf das Ökosystem und damit auf ihre Lebensgrundlage, oftmals Fischerei, auswirkt. Darüber hinaus hat das Meer vor allem bei nicht-westlichen Gemeinschaften eine große kulturelle und spirituelle Bedeutung, die sie vom Tiefseebergbau bedroht sehen. Über die tatsächlichen Auswirkungen für die küstennahe Bevölkerung sowie die sozialen und gesellschaftlichen Folgen des Tiefseebergbaus im Allgemeinen ist bisher wenig bekannt (Roche und Bice 2013). Die meisten Abbaugelände werden sich jedoch voraussichtlich in weiter Entfernung zu Küsten befinden, weshalb sich die direkten Auswirkungen auf Fischerei und Tourismus in Grenzen halten könnten. Trotzdem fürchten küstennahe Gemeinden bei der Entscheidung für oder gegen den Tiefseebergbau vor ihren Küsten übergangen zu werden (BSSIPC 2008). Widerstand gegen den Abbau mariner mineralischer Ressourcen findet sich allerdings auch in Gebieten, in denen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit keine negativen Umweltfolgen zu erwarten sind. So veröffentlichten die deutschen zivilgesellschaftlichen Organisationen gemeinsam ein Positionspapier, in dem sie erklärten, dass der Tiefseebergbau eine Hochrisikotechnologie und eine Belastung für Mensch und Umwelt darstellen würde (Maier 2018). Wenig überraschend vertreten Industrievertreter eine eher positive Sichtweise. Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) hebt dabei beispielsweise die Chancen für den deutschen Maschinenbau und den metallverarbeitenden Sektor und das mit der Aktivität verbundene Innovationspotenzial besonders hervor (BDI 2017). Große Einigkeit herrscht jedoch auf beiden Seiten, dass ein kommerzieller Tiefseebergbau – sollte er

irgendwann zur Realität werden – strikte Umweltauflagen erfüllen muss.

## 5 Umweltschutz

Für die Regulierung der Umweltfolgen sind je nach Lage der Abbaugelände in den Hoheitsgewässern und Ausschließlichen Wirtschaftszonen oder im internationalen Gebiet entweder die Küstenstaaten oder die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority – ISA) zuständig. Im Rahmen ihrer Zuständigkeit hat die ISA bisher drei umfassende Regeln für die Erforschung von Manganknollen, Eisenmangankrusten und Massivsulfiden erlassen. Zusammen mit den dazugehörigen Abbauregeln, die sich momentan im Entwurf befinden, werden diese Regelwerke den sogenannten »Mining Code« bilden. Darüber hinaus hat die ISA bereits Empfehlungen ausgesprochen, die unter anderem Vorgaben für den Inhalt der Umweltverträglichkeitsprüfung enthalten. Auch wenn diese Empfehlungen im Prinzip nicht rechtlich bindend sind, werden sie trotzdem befolgt. Weitere wichtige Bestandteile der Strategie zur Reduzierung negativer Umweltfolgen sind die Festlegung von Umweltstandards und die Erstellung regionaler Umweltmanagementpläne. In unmittelbarer Nähe des für den Manganknollenabbau vorgesehenen Gebiets in der CCZ hat die ISA beispielsweise neun 400 km × 400 km große Umweltschutzgebiete, sogenannte »Areas of Particular Environmental Interest« (APEI) deklariert. APEIs sollen das gesamte Spektrum der Lebensräume, der Artenvielfalt und der Funktionen des Ökosystems der Region abdecken. Innerhalb der Abbaugelände sollen sogenannte »Preservation Reference Zones« (PRZ) und »Impact Reference Zones« (IRZ) definiert werden, bei denen es sich um Gebiete handelt, die vom Tiefseebergbau unberührte bzw. beeinträchtigte Ökosysteme repräsentieren und somit einen direkten Vorher-Nachher-Vergleich erlauben (Jones et al. 2019). Die Identifizierung geeigneter vergleichbarer Flächen ist aufgrund lokaler Unterschiede der belebten und unbelebten Umwelt oft nicht trivial und stößt auch in der Wissenschaft auf Kritik.

## 6 Schlussfolgerung

Trotz der ausgeprägten negativen Folgen des Tiefseebergbaus gibt es Argumente, den Abbau mariner mineralischer Ressourcen nicht pauschal von der Hand zu weisen, denn auch der Landbergbau verursacht massive ökologische und soziale Probleme, die zu erheblichen langfristigen Schäden führen. Tatsächlich kommen mehrere Studien zu dem Schluss, dass der Tiefseebergbau dem Landbergbau aus ökologischer und ethischer Perspektive möglicherweise vorzuziehen sei (z. B. Batker und Schmidt 2015; Paulikas et al. 2020). Sie berufen sich dabei hauptsächlich auf die Tatsache, dass der Landbergbau große negative Auswirkungen auf

die sogenannten Ökosystemdienstleistungen hat, also auf den Nutzen, den der Mensch aus intakten Ökosystemen zieht, während der Tiefseebergbau hierbei kaum direkte Auswirkungen hat. So erfordert der Tiefseebergbau beispielsweise keine Abholzung von Wäldern, keine Umsiedlung der lokalen Bevölkerung, produziert deutlich weniger Abfälle und hat keine Auswirkungen auf die Qualität von Trinkwasservorräten. Außerdem würde für den Tiefseebergbau ausschließlich mobile Infrastruktur wie Schiffe und Unterwasserfahrzeuge eingesetzt, während der Landbergbau den Bau von Straßen und Gebäuden erfordert, die nach der Stilllegung der Bergwerke meist nicht abgebaut werden (Koschinsky et al. 2018). Da eine Vorkonzentrierung mariner mineralischer Rohstoffe im Vorfeld der metallurgischen Verarbeitung oft nicht möglich ist, entstehen beim Tiefseebergbau deutlich weniger Abfälle, auch Tailings genannt. Dabei handelt es sich im Landbergbau um feinkörnigen, oft toxischen Schlamm, der in großen Absatzbecken gelagert wird. Diese sogenannten »tailings dams« können zum Schauplatz schwerer Unfälle werden. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der Dambruch von Bento Rodrigues im November 2015, in dessen Folge ungefähr 50 Millionen Kubikmeter teilweise toxischen Schlamm in den Atlantik flossen, was nicht nur zu einer großflächigen Kontamination der Umwelt mit toxischen Metallen führte und die Trinkwasserversorgung unterbrach. Durch die Entstehung von Schlammlawinen wurden mehrere hunderttausend Menschen obdachlos und knapp 20 Menschen direkt in den Tod gerissen (Miranda und Marques 2016). Auch auf gesellschaftlicher Ebene könnte der Tiefseeberg-

bau die bessere Wahl sein, da er hochqualifizierte Arbeitskräfte erfordert und die Ausbeutung der lokalen Bevölkerung und den Einsatz von Kindern, wie es in vielen Bergwerken an Land der Fall ist, unwahrscheinlich bis unmöglich macht. Gleichzeitig muss natürlich bedacht werden, dass es an Land grundsätzlich die Möglichkeit der Renaturierung gibt und die Umwelt die Möglichkeit hat, sich zumindest zu einem gewissen Grad wieder von dem Eingriff durch den Menschen zu erholen. In der Tiefsee ist diese Möglichkeit in menschlichen Zeiträumen kaum gegeben. Es gibt zwar Ideen, die Wiederbesiedlung zerstörter Gebiete durch das Einbringen künstlicher Manganknollen oder anderer fester Strukturen zu beschleunigen, was bisher allerdings sowohl von wissenschaftlicher als auch von wirtschaftlicher Seite als wenig sinnvoll erachtet wird. Schlussendlich handelt es sich bei der Entscheidung zwischen Land- und Tiefseebergbau um die Wahl zwischen zwei Übeln. Eine wirkliche Lösung böte nur die Förderung der Kreislaufwirtschaft, also den Ausbau des Metallrecyclings, sowie die Reduzierung unseres Metallkonsums. Ob dies angesichts des anhaltenden Bevölkerungswachstums und der ständig zunehmenden Nachfrage nach Metallen ausreichen würde, ist jedoch fraglich. Es ist auch eine gesellschaftliche Entscheidung, welchen Ressourcenverbrauch für Computer und Smartphone wir für akzeptabel halten und wie der Ausbau erneuerbarer Energien und der Umstieg auf erneuerbare Energien gestaltet werden soll. Auch unter diesem Aspekt lohnt es sich, sich mit dem Thema »Tiefseebergbau« auseinanderzusetzen, um alle direkten und indirekten Vor- und Nachteile gründlich abzuwägen. //

---

## References

- Batker, David; Rowan Schmidt (2015): Environmental and social benchmarking analysis of Nautilus Minerals Inc. Solwara 1 project
- BDI (2017): Potenziale des Tiefseebergbaus. <https://bdi.eu/artikel/news/potenziale-des-tiefseebergbaus/>
- BSSIPC (2008): Bismarck Solomon Seas Indigenous Peoples Council (BSSIPC)
- Blue Mining (2014): Blue Mining: Breakthrough solutions for sustainable deep-sea mining. <https://bluemining.eu/facts-and-figures/>
- Clark, Malcolm R.; Ashley A. Rowden; Thomas Schlacher et al. (2010). The ecology of seamounts: Structure, function, and human impacts. *Annual Review of Marine Science*, DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081109
- Francheteau, Jean; H. David Needham; Pierre Choukroune et al. (1979): Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, DOI: 10.1038/277523a0
- Fritsche, Ulrich; Andrea Koschinsky; Andreas Winkler (2001): The different diffusive transport behaviours of some metals in layers of Peru Basin surface sediment. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00061-3
- Fuchs, Sebastian; Mark D. Hannington; Sven Petersen (2019): Diving gold in seafloor polymetallic massive sulfide systems. *Mineralium Deposita*, DOI: 10.1007/s00126-019-00895-3
- Gillard, Benjamin; Kaveh Purkiani; Damianos Chatzievangelou et al. (2019): Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific). *Elementa Science of the Anthropocene*, DOI: 10.1525/elementa.343
- Halbach, P.; Frank T. Manheim; Peter Otten (1982): Co-rich ferromanganese deposits in the marginal seamount regions of the Central Pacific Basin, results of the Midpac 1981. *Erzmetall*, Vol. 35, Nr. 9, S. 447–453
- Hein, James R.; Andrea Koschinsky (2014): Deep-Ocean ferromanganese crusts and nodules. *Treatise on Geochemistry*, DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6
- Hein, James R.; Francesca Spinardi; Nobuyuki Okamoto et al. (2015): Critical metals in manganese nodules from the Cook

- Islands EEZ, abundances and distributions. *Ore Geology Reviews*, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2014.12.011
- Heinrich, Luise; Andrea Koschinsky; Till Markus; Pradeep Singh (2020): Quantifying the fuel consumption, greenhouse gas emissions and air pollution of a potential commercial manganese nodule mining operation. *Marine Policy*, DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103678
- Jones, Daniel O. B.; Jennifer Durden; Kevin Murphy et al. (2019): Existing environmental management approaches relevant to deep-sea mining. *Marine Policy*, DOI: 10.1016/j.marpol.2019.01.006
- Koschinsky, Andrea (2016): Sources and forms of trace metals taken up by hydrothermal vent mussels, and possible adaptation and mitigation strategies. In: *The Handbook of Environmental Chemistry* (50th ed.). Springer International Publishing, DOI: 10.1007/698\_2016\_2
- Koschinsky, Andrea; Birgit Gaye-Haake; Christine Arndt et al. (2001): Experiments on the influence of sediment disturbances on the biogeochemistry of the deep-sea environment. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00060-1
- Koschinsky, Andrea; Peter Halbach (1995): Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, DOI: 10.1016/0016-7037(95)00358-4
- Koschinsky, Andrea; Luise Heinrich; Klaus Boehnke et al. (2018): Deep-sea mining: Interdisciplinary research on potential environmental, legal, economic, and societal implications. *Integrated Environmental Assessment and Management*, DOI: 10.1002/ieam.4071
- Maier, Jürgen (2018): Position paper of German civil society organisations on deep sea mining. [www.asienhaus.de/archiv/asienhaus/erklarungen/Position\\_paper\\_on\\_Deep\\_Sea\\_Mining-web.pdf](http://www.asienhaus.de/archiv/asienhaus/erklarungen/Position_paper_on_Deep_Sea_Mining-web.pdf)
- Mero, John L. (1965): *The mineral resources of the sea*. Elsevier
- Mewes, Konstantin; José M. Mogollón; Aude Picard et al. (2014): Impact of depositional and biogeochemical processes on small scale variations in nodule abundance in the Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, DOI: 10.1016/j.dsr.2014.06.001
- Miranda, Lucília Souza; Antonio Carlos Marques (2016): Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna – an example from the staurozoans (Cnidaria). *Biota Neotropica*, DOI: 10.1590/1676-0611-BN-2016-0169
- Misereor (2015): *Diskussionspapier: Tiefseebergbau – Unkalkulierbares Risiko für Mensch und Natur – Im Fokus – der Pazifik*
- Mudd, Gavin M. (2020): Metals and elements needed to support future energy systems. In: *Future Energy* (3rd ed.). Elsevier, DOI: 10.1016/b978-0-08-102886-5.00033-5
- Paulikas, Daina; Steven Katona; Erika Ilaves et al. (2020): Where should metals for the green transition come from? *DeepGreen*. [https://3421n927z6wq3ktzng37wbqk-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/04/LCA-White-Paper\\_Where-Should-Metals-for-the-Green-Transition-Come-From\\_FINAL\\_low-res.pdf](https://3421n927z6wq3ktzng37wbqk-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/04/LCA-White-Paper_Where-Should-Metals-for-the-Green-Transition-Come-From_FINAL_low-res.pdf)
- Petersen, Sven; Anna Krättschell; Nico Augustin et al. (2016): News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy*, DOI: 10.1016/j.marpol.2016.03.012
- Roche, Charles; Sarah Bice (2013): Anticipating social and community impacts of deep sea mining. *Deep Sea Minerals and the Green Economy*, S. 59–80
- Sharma, Rahul (2011): Deep-sea mining: Economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development. *Marine Technology Society Journal*, DOI: 10.4031/MTSJ.45.5.2
- Sparenberg, Ole (2019): A historical perspective on deep-sea mining for manganese nodules, 1965–2019. *The Extractive Industries and Society*, DOI: 10.1016/j.exis.2019.04.001
- SPC (2013a): *Deep Sea Minerals: Cobalt-rich ferromanganese crusts – A physical, biological, environmental, and technical review*. Vol. 1C. Secretariat of the Pacific Community
- SPC (2013b): *Deep Sea Minerals: Manganese nodules – A physical, biological, environmental, and technical review*. Vol. 1B. Secretariat of the Pacific Community
- SPC (2013c): *Deep Sea Minerals: Sea-floor massive sulphides – A physical, biological, environmental, and technical review*. Vol. 1A. Secretariat of the Pacific Community
- Van Dover, Cindy Lee (2011): Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: What is at risk? *ICES Journal of Marine Science*, DOI: 10.1093/icesjms/fsq086
- Van Dover, Cindy Lee (2004): The biological environment of polymetallic sulphides deposits, the potential impact of exploration and mining on this environment, and data required to establish environmental baselines in exploration areas. *Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop*, S. 169–190
- Vanreusel, Ann; Anna Hilario; Pedro Ribeiro et al. (2016): Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep26808
- Weaver, Philip P. E.; David S. M. Billett; Cindy Lee Van Dover (2018): Environmental risks of deep-sea mining. In: *Handbook on Marine Environment Protection*. Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-60156-4\_11