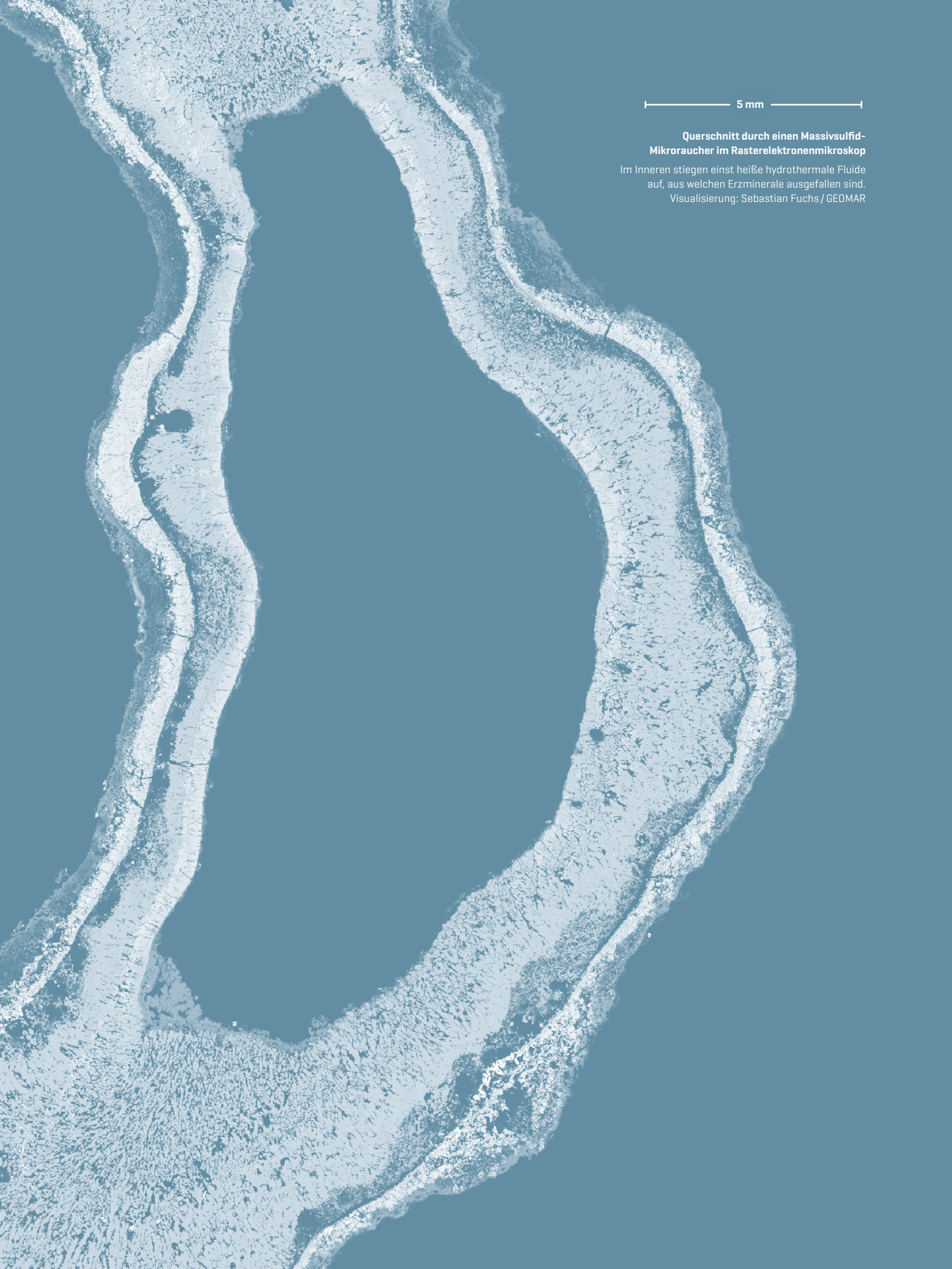


Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee

Entstehung, Potential und Risiken

HELMHOLTZ

SPITZENFORSCHUNG FÜR
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN



5 mm

**Querschnitt durch einen Massivsulfid-
Mikroraucher im Rasterelektronenmikroskop**

Im Inneren stiegen einst heiße hydrothermale Fluide
auf, aus welchen Erzminerale ausgefallen sind.
Visualisierung: Sebastian Fuchs / GEOMAR

Der Meeresboden als Rohstoffquelle?

Alle metallischen Rohstoffe, die die Menschheit derzeit benötigt, werden an Land und damit nur auf knapp einem Drittel der Oberfläche unseres Planeten gewonnen. Die Ozeane, die mit 71 Prozent den größten Teil der Erdoberfläche ausmachen, werden bisher kaum genutzt. Doch die anhaltend hohe Nachfrage und die daher stark gestiegenen Rohstoffpreise rücken den Meeresbergbau in der Tiefsee jetzt in den Bereich der Wirtschaftlichkeit.

Der Meeresboden ist bereits heute eine wichtige Rohstoffquelle für die Menschheit. So werden Sand und Kies sowie Öl und Gas bereits seit vielen Jahren aus dem Meer gewonnen. Darüber hinaus fördert man seit langem Diamanten vor den Küsten Südafrikas und Namibias sowie Vorkommen von Zinn, Titan und Gold entlang der Küsten Afrikas, Asiens und Australiens. Die Gewinnung von Rohstoffen aus dem Meer ist also nicht neu. In naher Zukunft aber könnten eine Reihe von mineralischen Rohstoffen, die aus der Tiefsee gefördert werden sollen, an ökonomischer Bedeutung gewinnen. Dazu zählen Massivsulfide, die sich in Bereichen vulkanischer Aktivität an den Plattengrenzen in den Ozeanen bilden, Manganknollen auf den sedimentbedeckten Tiefseeebenen sowie kobaltreiche Mangankrusten entlang der Flanken alter, submariner Gebirgskzüge. Neben den wirtschaftlichen Aspekten spielt aber auch der Schutz der marinen Umwelt eine wichtige Rolle.

Meeresforschung ist Zukunftsforschung: Am GEOMAR werden bereits seit vielen Jahren Untersuchungen zu marinen Rohstoffvorkommen betrieben. Mit einem interdisziplinären Forschungsansatz und in enger Kooperation mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern weltweit werden die verschiedenen Aspekte, die für die Nutzung mariner mineralischer Rohstoffe relevant sind, umfassend betrachtet. Mit dieser Broschüre möchten wir Ihnen die Entstehung, das wirtschaftliche Potential und die ökologischen Risiken eines möglichen Abbaus der Ressourcen aus der Tiefsee etwas näher vorstellen.



Prof. Dr. Peter Herzig
Direktor GEOMAR



MASSIVSULFIDE
Mehr dazu ab Seite 08



MANGANKNOLLEN
Mehr dazu ab Seite 14



KOBALTKRUSTEN
Mehr dazu ab Seite 20

Inhalt

Bergung eines Schlotfragments eines
Schwarzen Rauchers im südlichen zentral-
indischen Rücken aus 3.320 Metern Tiefe.
Foto: ROV-Team / GEOMAR

EINLEITUNG

Zukünftiger Bedarf metallischer Rohstoffe	05
Techniken zur Erforschung von Tiefsee-Ressourcen am GEOMAR	06

MASSIVSULFIDE

Schwarze Raucher – Erzfabriken der Tiefsee	08
Entstehung von Massivsulfiden	10
Biodiversität	11
Vorkommen und Rohstoffpotenzial von Massivsulfiden	12

MANGANKNOLLEN

Reiche Rohstofffelder am Meeresboden	14
Entstehung von Manganknollen	16
Biodiversität	17
Vorkommen und Rohstoffpotenzial von Manganknollen	18

KOBALTKRUSTEN

Metallischer Schatz am Hang der Seeberge	20
Entstehung von Kobaltkrusten	22
Biodiversität	23
Vorkommen und Rohstoffpotenzial von Kobaltkrusten	24

ABBAU UND UMWELTRISIKEN

Umweltschädigungen durch Tiefseebergbau	26
Regeln für den Abbau	28
Abbautechnologien	30
Umweltmonitoring zu Auswirkungen des Tiefseebergbaus	32
Impressum und Links	34



Zukünftiger Bedarf metallischer Rohstoffe

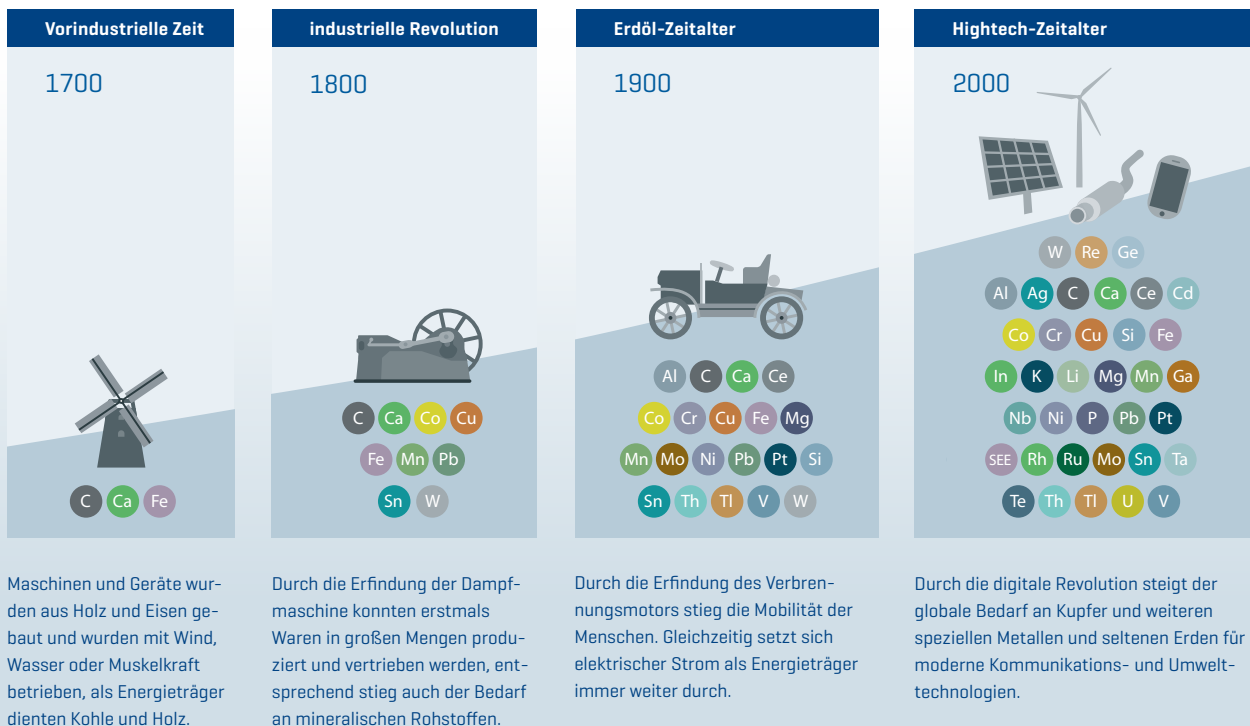
Die weltweite Versorgung mit Rohstoffen wird immer komplexer. Sie wird einerseits getrieben durch das weltweite Wirtschaftswachstum, andererseits durch die Entwicklung neuer Technologien. Neben der bergbaulichen Gewinnung von Rohstoffen an Land und einem zunehmenden Anteil recycelter Rohstoffe können auch Rohstoffe aus der Tiefsee zukünftig einen Beitrag zur Deckung des Bedarfs leisten.

Die Erde stellt uns eine Vielzahl an natürlichen mineralischen Rohstoffen bereit, die wir in unserer hochtechnisierten Gesellschaft benötigen. Zurzeit werden fast alle diese Rohstoffe an Land abgebaut, auf einer Fläche, die weniger als ein Drittel unseres Planeten ausmacht. Allerdings wird es an Land immer schwieriger, reiche Vorkommen zu finden. Dies zwingt die Bergbauindustrie dazu, Lagerstätten mit geringen Tonnagen abzubauen und nach Lagerstätten in abgelegenen Regionen der Erde oder in großer Tiefe zu suchen. Dies ist mit einem Anstieg des Flächenverbrauchs und erhöhten Beeinträchtigungen der Umwelt verbunden. Gleichzeitig steigt durch Bevölkerungswachstum, Umstellung auf grüne Technologien und das generelle Wirtschaftswachstum die Nachfrage nach Metallen. Rohstoffe, wie Kupfer, Nickel und Kobalt, die auch in der Tiefsee zu finden sind, werden durch den weltweiten Ausbau der E-Mobilität einen starken Nachfrageimpuls erfahren. So sind Kobalt und Nickel wichtige Bestandteile von Lithium-Ionen-Batterien, deren

Markt durch die zunehmende Elektrifizierung der Mobilität und den Ausbau der Digitalisierung auch in Zukunft weiter stark wachsen wird. Bei Kupfer wird erwartet, dass neben der E-Mobilität auch die weltweit zunehmende Elektrifizierung und der damit verbundene Netzausbau einen Impuls in der Nachfrage auslösen wird.

Neben der steigenden Nachfrage können geopolitische Interessen die Verfügbarkeit von Metallen weiter einschränken. Dies wurde vor wenigen Jahren deutlich, als China die Exporte der sogenannten Seltenen Erden aussetzte und die Preise auf den Rohstoffmärkten kurzfristig explodierten. China produziert derzeit 81 Prozent der Seltenen Erden und kontrolliert damit faktisch den Markt. Es gibt daher hier, wie auch bei anderen Metallen, vorhersehbare Risiken für eine sichere Rohstoffversorgung der verarbeitenden Industrie in Deutschland, Europa und weltweit. Aus diesem Grund interessiert sich eine Reihe von Ländern für alternative Rohstoffvorkommen. Zusammen mit neuen Abbaumethoden an Land sowie deutlich erhöhten Recycling-Raten wird dabei auch ein potentieller Abbau in der Tiefsee als mögliche Alternative für eine sichere Rohstoffversorgung angesehen.

Anstieg des Bedarfs an mineralischen Rohstoffen Grafik: CC-BY 4.0 petraboeckmann.de/Meeresatlas 2017, Quelle: Achzet





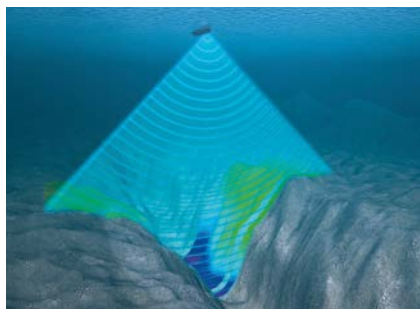
Das Forschungsschiff SONNE

Die SONNE ist das jüngste Mitglied der deutschen Forschungsflotte und gilt als eines der weltweit modernsten Forschungsschiffe. Eine eigens entwickelte Rumpfform verhindert, dass sich Blasen unter dem Rumpf bilden, die bei der Vermessung von Meeresböden stören könnten. Foto: Christian Berndt / GEOMAR



Aussetzen von AUV ABYSS von Bord der SONNE

Das autonome Unterwasserfahrzeug verfügt über verschiedene Echolote zur bathymetrischen Kartierung in höchster Auflösung. Zusätzlich ist das AUV mit einer Reihe chemischer und physikalischer Sensoren sowie einem Videokamerasystem ausgestattet. Foto: Emanuel Wenzlaff / GEOMAR



Schiffsgebundene Fächerecholote können mehrere hundert einzelne Fächersegmente erzeugen, die den Meeresboden senkrecht zur Fahrtrichtung des Schiffes hochauflösend abtasten. Grafik: Wärtsilä ELAC Nautik

Techniken zur Erforschung von Tiefsee-Ressourcen am GEOMAR

Ziel der Forschungsgruppe „Marine Mineralische Rohstoffe“ ist es, die Bildung von potenziellen Lagerstätten zu verstehen und die Erkundung des Meeresbodens voranzutreiben, um das Potential dieser Vorkommen abschätzen und deren Auftreten vorhersagen zu können. Eine mögliche Rohstoffausbeutung in der Tiefsee ist aber mit grossflächigen Umweltauswirkungen verbunden. Die Forschungseinheit „Marine Geosysteme“ am GEOMAR untersucht die Prozesse und Stoffumsätze im und am Meeresboden, um die zu erwartenden Schädigungen der Ökosysteme in der Tiefsee abzuschätzen und entwickelt neue Methoden und Konzepte zur Umweltüberwachung.



Analyse der bathymetrischen Daten: Auf Basis der mit AUV ABYSS gewonnenen hochauflösenden Karten des Meeresbodens besprechen die Wissenschaftler das weitere Vorgehen. Foto: John Jamieson, GEOMAR

Erkundung des Meeresbodens

Aufgrund der Arbeitsgebiete in den großen Meeren der Erde greifen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vor allem auf die mittelgroßen und großen deutschen Forschungsschiffe zurück. Neben der am GEOMAR beheimateten POSEIDON und ALKOR sind dies vor allem die Forschungsschiffe METEOR im Atlantik, MARIA S. MERIAN im Nordatlantik und die neue SONNE für Seegebiete im Pazifik und im Indischen Ozean.

Eines der wichtigsten Hilfsmittel zur Erkundung des Meeresbodens in hundert bis tausenden Metern Wassertiefe ist die schiffsgestützte Tiefenmessung (Bathymetrie). Mit modernen Fächerecholoten kann der Meeresboden in hoher Auflösung kartiert werden. Zur genaueren Untersuchung verfügt das GEOMAR über das autonome Unterwasserfahrzeug (AUV) ABYSS. Sein Name bezieht sich auf das sogenannte Abyssal, ein Begriff, der den Meeresboden zwischen 2.000 und 6.000 Metern Tiefe umfasst. In diesen Tiefen gleitet das stromlinienförmige AUV mit bis zu vier Knoten dicht über den Meeresboden, wobei es Hindernissen selbstständig ausweichen kann.



Augen und Arme in der Tiefsee

ROV KIEL 6000 ist einer der modernsten Tauchroboter für wissenschaftliche Fragestellungen weltweit. Mit einer Tauchtiefe von bis zu 6.000 Metern ist das ferngesteuerte Fahrzeug in der Lage, 95 Prozent des weltweiten Meeresbodens zu erreichen und zielgenaue Beprobungen vorzunehmen. Foto: Bernd Grundmann

Das Bohrschiff JOIDES RESOLUTION

Mit 140 Meter Länge und 60 Meter Höhe gehört das Bohrschiff zu den größten Forschungsschiffen der Welt. JOIDES Resolution ist für das internationale Integrated Ocean Drilling Program (IODP) auf allen Weltmeeren im Einsatz, um mehr über die äußere Hülle der Erde und die Prozesse im Erdinneren zu erfahren. Foto: Arito Sakaguchi, IODP/TAMU

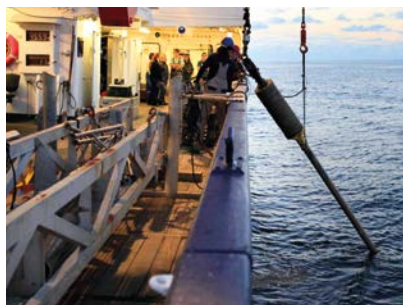
Techniken zur Beprobung

Zur Probenahme stehen den Forschenden zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Eine einfache Kettensack-Dredge wird seit Jahrzehnten benutzt, hat jedoch den Nachteil, dass keine zielgeführte Beprobung möglich ist. Einzelne Stichproben erhält man mit Multicorern und videogeführten Greifern. Genauer, aber auch aufwendiger, ist die Beprobung mit einem Tauchboot oder mittels sogenannter Remotely Operated Vehicles (ROVs). Das GEOMAR verfügt mit JAGO über Deutschlands einziges bemanntes Forschungstauchboot sowie über zwei Tauchroboter: ROV PHOCA für Einsätze bis 3.000 Meter und ROV KIEL 6000 für Einsätze bis 6.000 Meter Wassertiefe. Um weiter in den Meeresboden einzudringen, werden Bohrungen vorgenommen. Bei weichem Untergrund werden dazu Schwerelote eingesetzt. Um zu erkunden, in bis zu welcher Tiefe erzhaltige Gesteine vorkommen, werden mobile Plattformen oder Bohrschiffe eingesetzt. Noch an Bord oder spätestens an Land werden die Proben dann gesichtet, aufbereitet und mit unterschiedlichen Methoden analysiert. Dazu stehen am GEOMAR zahlreiche Labore, wie das Geochronologie-Labor, das Mikrosonden-Labor, das Laser-Ablations ICPMS-Labor und das Labor für Radiogene Isotope zur Verfügung.

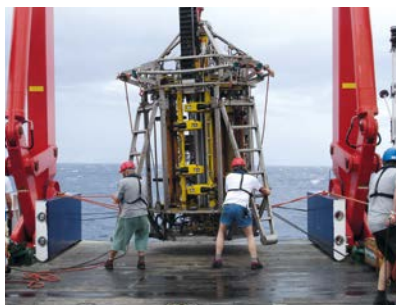
mehr: www.geomar.de/forschen/marine-ressourcen/mmr



Videogreifer sind im Inneren mit einer Kamera ausgerüstet, die Echtzeit-Videos via Tiefseekabel zum Schiff sendet. So können die Schaufeln kontrolliert geschlossen werden und gezielt Gesteinsproben genommen werden. Foto: Sven Petersen / GEOMAR



Schwerelote sind lange Stahlröhren, die senkrecht ins Wasser herabgelassen werden. Bestückt mit tonnenschweren Gewichten dringen sie bis zu 20 Meter in den Meeresboden ein und gelangen mitsamt des eingeschlossenen Sediments wieder an Bord. Foto: Elger Esser



Rockdrill 2, das Bohrgerät des British Geological Survey, ist in der Lage, direkt am Meeresgrund bis zu 15 Meter lange Gesteinsproben zu erbohren. Der Kern wird hier in 10 jeweils 1,5 Meter langen Tranchen erbohrt. Quelle: GEOMAR



Untersuchung an Bord: Im Nasslabor des Forschungsschiffs POSEIDON werden die mit dem Tauchboot JAGO gesammelten Gesteinsproben eines aktiven Unterwasser-Vulkans direkt in Augenschein genommen. Foto: Maike Nicolai / GEOMAR

**Schwarzer Raucher im Krater des
Niua-Unterwasservulkans im Lau-
Becken zwischen Fidschi und Samoa.**

Unter Leitung des GEOMAR hat ein internationales Forschungsteam im April 2016 mit dem Niua-South-Krater erstmals ein komplettes Hydrothermalfeld zentimetergenau vermessen. Als Arbeitsplattform diente dabei das Forschungsschiff FALKOR des Schmidt Ocean Institute, für die Vermessung nutzte das Team das kanadische ROV ROPOS. Foto: GEOMAR / Schmidt Ocean Institute / CSSF



Massivsulfide

Schwarze Raucher – Erzfabriken der Tiefsee

Bei Schwarzen Rauchern handelt es sich um Hydrothermalquellen an vulkanisch aktiven Zonen der Tiefsee. Der schwarze „Rauch“, der aus den bis zu 30 Meter hohen Schloten quillt, besteht aus fein verteilten Sulfidpartikeln. Auch die Schloten selbst und die Hügel unter ihnen bestehen aus Metall-Schwefelverbindungen, den sogenannten Massivsulfiden.

KURZSTECKBRIEF MASSIVSULFIDE	
Hauptvorkommen	vulkanisch aktive Zonen an submarinen Plattengrenzen
Wassertiefe	1.000 bis 4.000 Meter
Hauptbestandteile	eisenreiche Schwefelverbindungen
wirtschaftlich interessante Metalle	Kupfer und Zink (in Spuren auch Gold, Silber, Germanium, Indium, Tellur und Wismut)
Verwendung	Komponenten für die Kommunikationstechnologie

Im Jahr 1979 taucht das amerikanische Forschungstauchboot ALVIN im pazifischen Ozean. Durch die kleinen Bullaugen der Druckhülle erblickte die Besatzung auf dem Meeresboden in rund 2.600 Metern Tiefe meterhohe Schloten, aus denen scheinbar schwarze Rauchwolken quollen. Die Wissenschaftler hatten die ersten hydrothermalen Quellen, sogenannte „schwarze Raucher“, entdeckt. Untersuchungen zeigten, dass sich rund um die Quellen Minerale ablagern und Vorkommen sogenannter Massivsulfide bilden. Inzwischen sind mehr als 390 Vorkommen in allen Ozeanen bekannt, wobei es aber gewaltige Unterschiede in der Größe der Vorkommen gibt. Hydrothermalquellen sind aber nicht nur Rohstofflieferant, sondern auch ein außergewöhnlicher Lebensraum.

In den letzten Jahren hat das wirtschaftliche Interesse an den Massivsulfiden zugenommen. Die erste Abbaulizenz für Massivsulfide rund um ein erloschenes Hydrothermalsystem wurde 2011 für ein Vorkommen vor der Küste Papua-Neuguineas erteilt. Der Abbau hat aber noch nicht begonnen (Stand 2019).



Schlotfragment eines Schwarzen Rauchers

Die Probe wurde 2016 während der Fahrt mit dem Forschungsschiff FALKOR am Niua Vulkan aus einer Wassertiefe von 1.146 Metern genommen.
Foto: Jan Steffen / GEOMAR

Entstehung von Massivsulfiden an schwarzen Rauchern

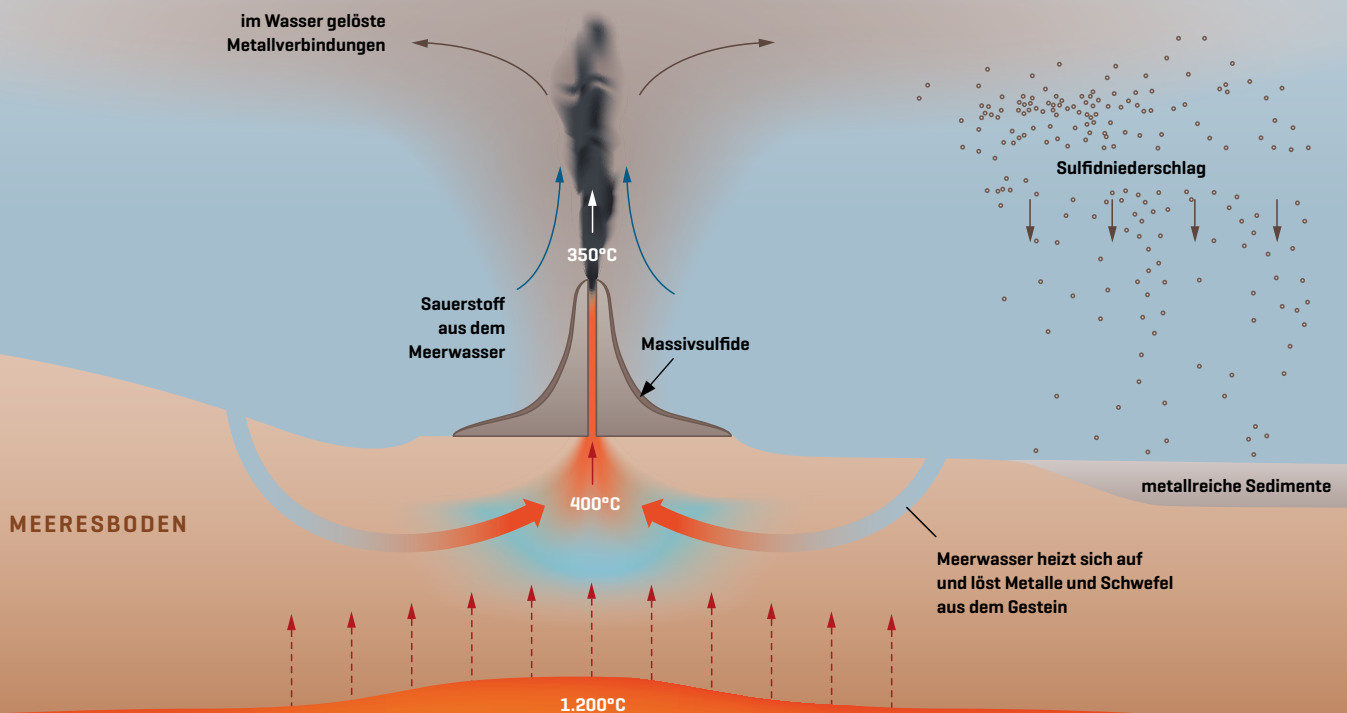
Die faszinierenden Formationen der Schwarzen Raucher in der Tiefsee entstehen durch das Zusammenspiel von vulkanischer Aktivität und Meerwasser an aktiven Platten-grenzen.

Das Meerwasser sickert an den Hydrothermalquellen durch Risse und Spalten im Meeresboden langsam in die Tiefe und trifft in zwei bis drei Kilometern Tiefe auf riesige Magmakammern. Dort wird es erhitzt und steigt aufgrund seiner geringeren Dichte wieder auf. Dabei verwandeln chemische Prozesse das Wasser in eine schwache Säure. Sie wäscht auf dem Weg zurück zum Meeresboden Elemente, wie Kupfer, Zink, Eisen, Gold und Silber sowie Schwefel, aus dem umgebenden Gestein aus. Mit diesen Stoffen angereichert trifft die teilweise über 400 Grad heiße Lösung am Meeresboden auf das etwa zwei bis vier Grad kalte Bodenwasser des Ozeans. Die Metall-Schwefelverbindungen fallen aus und lagern sich am Meeresboden als Sulfidhügel, -schornsteine oder metallreiche Sedimente ab.



Fünf Meter hoher Schlot eines Schwarzen Rauchers im zentralen Atlantik.

Der größte bisher entdeckte Schwarze Raucher wurde am Juan de Fuca Rücken entdeckt. Sein Schlot war 45 Meter hoch. Foto: Nico Augustin / GEOMAR





1



2



3

Biodiversität

Das erste Leben auf der Erde könnte an den Schwarzen Rauchern in der Tiefsee entstanden sein. Hier hat sich im Laufe von Jahrmillionen ein Ökosystem entwickelt, das perfekt an die eigentlich lebensfeindlichen Bedingungen angepasst ist.

In einer Umgebung von absoluter Dunkelheit, mit extremem Wasserdruck sowie mit giftigen Metallverbindungen angereichertem Wasser und Temperaturen von mehr als 350 Grad Celsius befindet sich dort eine einzigartige Artengemeinschaft: Dichte Populationen von Schnecken [1], Muscheln [2], Krebsen [3], Garnelen [4] und Röhrenwürmern [5] bevölkern die Hydrothermalquellen. Basis dieses Ökosystems bilden Matten von urtümlichen Mikroorganismen [6], die, unabhängig vom Licht, ihre Energie aus der Umwandlung von Schwefel und Methan beziehen.

Fotos: ROV-Team, GEOMAR



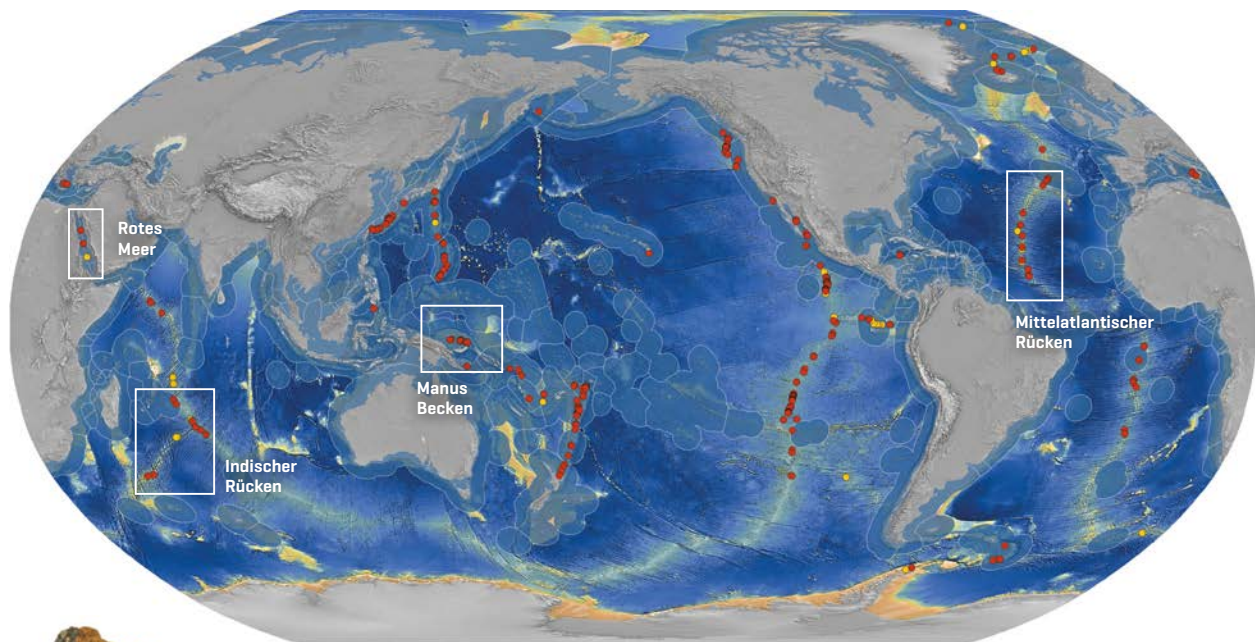
4



5



6



Verteilung von aktiven (rot) und inaktiven (gelb) Schwarzen Rauchern im Ozean

Gebiete von besonderem wirtschaftlichem Interesse und Grenzen der Ausschließlichen Wirtschaftszonen sind hervorgehoben. Große Bereiche, insbesondere in den südlichen Ozeanen, sind bisher nicht untersucht worden und sind nur deshalb nicht auf der Karte verzeichnet. [Stand 2019]. Karte: Sven Petersen / GEOMAR

Vorkommen und Rohstoffpotenzial von Massivsulfiden

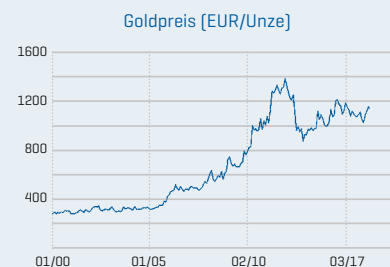
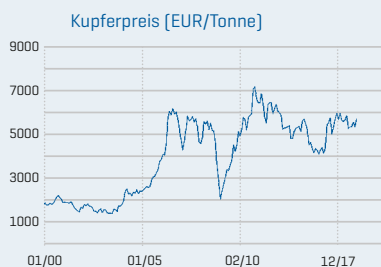
Die Wertmetallgehalte und das wirtschaftliche Potential von Massivsulfiden unterscheiden sich deutlich von denen der Manganknollen und Kobaltkrusten. Es gibt darüber hinaus gewaltige Unterschiede in der Größe der einzelnen Vorkommen. Dazu kommt, dass die Bunt- und Edelmetallgehalte der Vorkommen je nach Region stark schwanken.

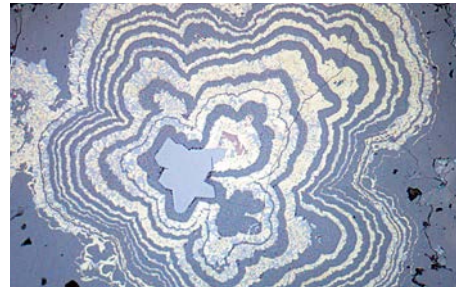
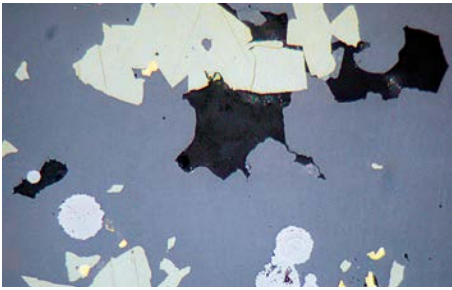
Die Schwarzen Raucher entlang der Mittelozeanischen Rücken werden überwiegend aus eisenreichen Sulfiden aufgebaut, an denen wenig wirtschaftliches Interesse besteht. Hier machen Kupfer und Zink zusammen etwa nur ein Achtel der Massivsulfide aus. Die Goldgehalte liegen bei knapp über 1 Gramm pro Tonne. Eine besondere Klasse von Vorkommen hat sich an den Rücken des Atlantischen und Indischen Ozeans an Verwerfungen abseits der zentralen vulkanischen Rückenachse

gebildet. Hier sind durch tektonische Prozesse Gesteine des oberen Erdmantels am Meeresboden aufgeschlossen. Massivsulfide, die an solche Gesteine gebunden sind, weisen erhöhte Kupfer und Goldgehalte auf. Die Vorkommen im Südwestpazifik, wie zum Beispiel

im Manus Becken, zeigen die höchsten Kupfer-, Zink-, und Goldgehalte und sind daher für einen möglichen Bergbau besonders interessant. Neben diesen Elementen gibt es aber auch eine ganze Reihe von Metallen, die in Spuren von einigen Gramm pro Tonne in solchen Sulfiden enthalten sein können und in eine wirtschaftliche Betrachtung einfließen könnten. Allerdings sind die Gehalte sehr großen Schwankungen unterworfen und die Ergebnisse der Untersuchungen zu ihrer Verteilung noch sehr lückenhaft. Die südwestpazifischen Vorkommen befinden

Veränderung verschiedener Metallpreise von 2000 – 2019 Quelle: InfoMine.com





Mikroskopische Aufnahmen von Massivsulfiden

Links: kleine, hellgelbe Goldflitter als Einschlüsse in verschiedenen Sulfiden. Die Größe der Goldkörner liegt zwischen 2 – 10 Mikrometern. Rechts: Die physikochemischen Eigenschaften der heißen Lösungen bilden Wechsellagerungen aus Zinksulfiden [mittelgrau] und Kupfersulfiden [gelb, hellgrau, braun].

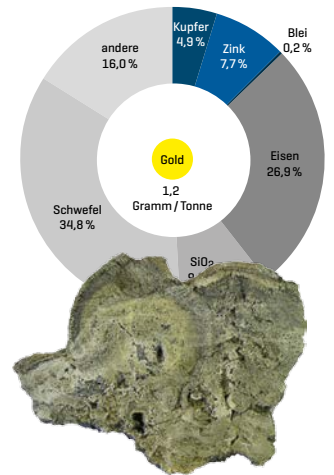
sich zusätzlich in vergleichsweise geringen Wassertiefen mit weniger als 2.000 Metern sowie in den Wirtschaftszonen von Anrainerstaaten, was einem möglichen Abbau technologisch und rechtlich entgegenkommt. Die Firma Nautilus Minerals hat im Januar 2011 die erste Abbaulizenz für ein Vorkommen mit circa zwei Millionen Tonnen Sulfid in den Hoheitsgewässern von Papua-Neuguinea erhalten.

Das größte bekannte Sulfidvorkommen befindet sich im Roten Meer. Hier treten die Sulfide nicht als Schwarze Raucher, sondern in Form eisenreicher Erzschlämme mit erhöhten Gehalten an Kupfer, Zink, Silber und Gold auf. Dieses Vorkommen in Wassertiefen um die 2.000 Meter ist seit den 1960er Jahren bekannt. Dank der schlammigen Konsistenz dieser Lagerstätten erscheint ein Abbau technisch unproblematisch und wurde bereits in den 1980er Jahren erfolgreich getestet. Für dieses Vorkommen wurde 2010 eine auf 30 Jahre befristete Abbaulizenz gewährt, wobei noch nicht bekannt ist, wann mit einem Abbau begonnen werden soll.

Über 90 Prozent aller bekannter Vorkommen sind zu klein, um wirtschaftlich interessant zu sein. Bisher fand die Erkundung immer

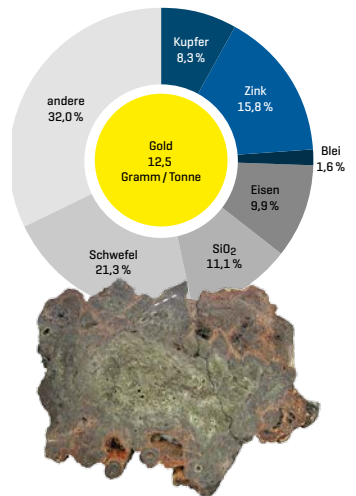
über Anomalien in der Wassersäule statt. Das bedeutet: Ein aktiver schwarzer Raucher ist durch seine „Rauchfahne“ in der Wassersäule leicht zu finden. Diese Anomalien können über große Bereiche und über größere Entfernung bestimmt und zu ihrer Quelle zurückverfolgt werden. Dies führt allerdings dazu, dass bei der Suche nur aktive Schwarze Raucher gefunden werden. Diese Systeme sind aber sehr jung und daher auch sehr klein. Zur Erkundung inaktiver, größerer Erzvorkommen gibt es noch großen Forschungsbedarf. So wurden im Rahmen des EU-Projektes „Blue Mining“ bereits Technologien für die Suche nach diesen wirtschaftlich interessanteren Vorkommen entwickelt.

Während bei Knollen und Krusten die Probenahme direkt am Meeresboden für Rohstoffberechnungen ausreicht, sind bei Massivsulfiden Bohrungen unerlässlich, um Informationen aus dem Inneren der Ablagerungshügel zu bekommen. So hat sich bei vielen Untersuchungen gezeigt, dass es große Unterschiede in den Metallgehalten zwischen Proben von der Oberfläche und aus dem Inneren gibt. Da solche Bohrungen nur von wenigen Vorkommen existieren, sind Abschätzungen des globalen Rohstoffpotentials der Massivsulfide bisher kaum möglich.



Schwarzer Raucher vom Mittelatlantischen Rücken

Viele Vorkommen an Mittel-ozeanischen Rücken werden vorwiegend aus Eisen-Schwefelverbindungen aufgebaut.



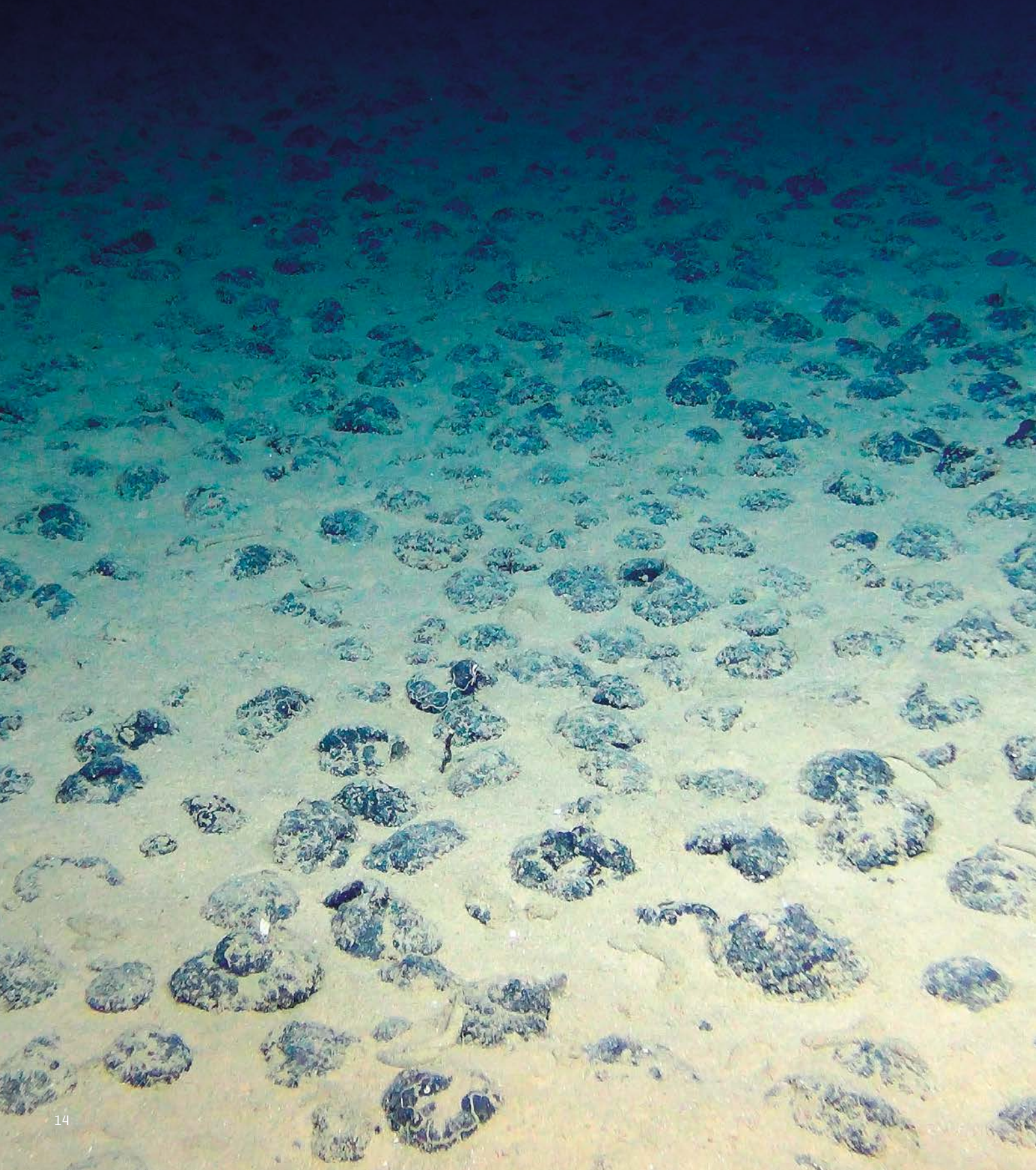
Schwarzer Raucher aus dem östlichen Manus Becken vor Papua-Neuguinea

Deutlich ist der Unterschied zwischen einem kupferreichen Kern und einem bräunlichen zinkreichen Außenbereich zu sehen. Der durchschnittliche Goldgehalt beträgt für diese Probe 15 Gramm Gold pro Tonne Erz.



Nach heutigem Stand scheinen nur wenige der bekannten Massivsulfid-Vorkommen über die ausreichende Größe und Metallgehalte zu verfügen, um wirtschaftlich abbaubar zu sein. Um dieses Bild zu ändern, ist es nötig, neue Erkundungstechnologien zu entwickeln, die über die Suche nach kleinen, aktiven Vorkommen hinausgehen, und nach großen, inaktiven Vorkommen abseits der vulkanisch aktiven Zonen zu suchen. Trotzdem erscheint das Rohstoffpotential der Massivsulfide, verglichen mit dem der Manganknollen oder kobaltreichen Mangankrusten, eher gering zu sein. Allerdings sind, aufgrund des dreidimensionalen Charakters der Vorkommen, die Umweltauswirkungen eines Abbaus vermutlich deutlich geringer als bei den großen Flächen, die bei einem Abbau von Knollen und Krusten zu erwarten sind.

Manganknollen auf dem Meeresboden in der Clarion-Clipperton-Zone. Das Bild wurde mit ROV KIEL 6000 während der Expedition S0239 mit FS SONNE im April 2015 aufgenommen.



Manganknollen

Reiche Rohstofffelder am Meeresboden

In den Ebenen der Tiefsee liegen metallische Klumpen auf tausenden Quadratkilometern dicht an dicht, wie Kartoffeln auf einem Acker: Manganknollen bilden die wichtigste potentielle marine Rohstoffquelle, da sie von einigen Metallen größere Mengen enthalten, als die heute bekannten und abbaubaren Landlagerstätten.

KURZSTECKBRIEF MANGANKNOLLEN	
Hauptvorkommen	Sedimentbedeckte Tiefseeebenen aller Ozeane
Wassertiefe	3.000 bis 6.000 Meter
Hauptbestandteile	Silikate, Mangan- und Eisenoxide
wirtschaftlich interessante Metalle	Nickel, Kupfer und Kobalt (in Spuren auch Seltene Erden, Molybdän, Lithium und Titan)
Verwendung	Batterien, Umwelt- und Energietechnik

Manganknollen in der Tiefsee sind bereits seit der britischen Challenger-Expedition von 1872 bis 1876 bekannt. Sie galten aber lange nur als Kuriosum. In den 1960er und 1970er Jahren gerieten sie erstmals konkret ins Visier der Industrienationen, die sie als mögliche Rohstoffquelle erkannten. Die Manganknollen-Begeisterung in den 1970er-Jahren ging so weit, dass angebliche Abbauprobeversuche sogar als Tarnung für eine verdeckte Operation des amerikanischen Geheimdienst CIA im Zentralpazifik erhalten mussten. Echte Abbauprobeversuche zeigten jedoch rasch, dass die Technologie noch nicht reif war, um reibungslos in mehreren tausend Meter Wassertiefe zu funktionieren.

In den vergangenen Jahren reaktivierten steigende Rohstoffpreise und die wachsende Nachfrage die Pläne zum Abbau der Metallknollen vom Tiefseeboden jedoch. Abbaulizenzen oder eine erfolgreich erprobte Technologie gibt es aber nach wie vor nicht. Auch die Frage nach den großräumigen Auswirkungen für die Tiefsee-Umwelt ist noch nicht abschließend beantwortet.



Manganknolle aus dem Nordwest-Pazifik

Diese Probe wurde während der Expedition S0265 mit dem Forschungsschiff SONNE am Papanin Rücken aus einer Wassertiefe von 4.490 Metern genommen. Foto: Jan Steffen / GEOMAR

Entstehung von Manganknollen

Manganknollen kommen weltweit an den Meeresböden in Tiefen von 3.000 bis 6.000 Metern vor. Sie bestehen aus Metallen, die durch Erosion ins Meer eingetragen werden oder aus den Hydrothermalquellen in vulkanisch aktiven Bereichen der Meere stammen. Ihre Wachstumsrate beträgt wenige Millimeter in einer Million Jahre, so können größere Knollen mit einer Größe von 15 Zentimetern bis zu 15 Millionen Jahre alt sein.

Manganknollen gibt es in vielen Formen und Größen. Sie können rund, länglich oder flach sein. Ihre Erscheinung wird durch die Form des Kerns, dem umgebenden Sediment und ihrer Wachstumsart bestimmt. Manganknollen wachsen, indem sich im Meer gelöste Metallionen aus dem bodennahen Wasser (hydrogenetisches Wachstum) oder dem im Sediment enthaltenen Wasser (diagenetisches Wachstum) an einem Kern ablagern. Dieser Kern kann zum Beispiel aus Gesteinsfragmenten, Schalenresten oder Haifischzähnen bestehen. Mit der Zeit bilden sich so konzentrische Lagen um den Kern.

Meist wachsen Knollen sowohl dia- als auch hydrogenetisch, wobei sich die jeweiligen Anteile in verschiedenen Meeresgebieten unterscheiden. Faszinierend ist, dass Manganknollen extrem langsam wachsen. Mit jeder Million Jahre nimmt ihre Dicke nur millimeterweise zu. Hydrogenetische Knollen wachsen pro Million Jahre bis zu 10 Millimeter, diagenetische zwischen 10 und 100 Millimeter. Daraus folgt, dass sich Manganknollen nur dort bilden konnten, wo über derart lange Zeiträume konstante Umweltbedingungen herrschten.



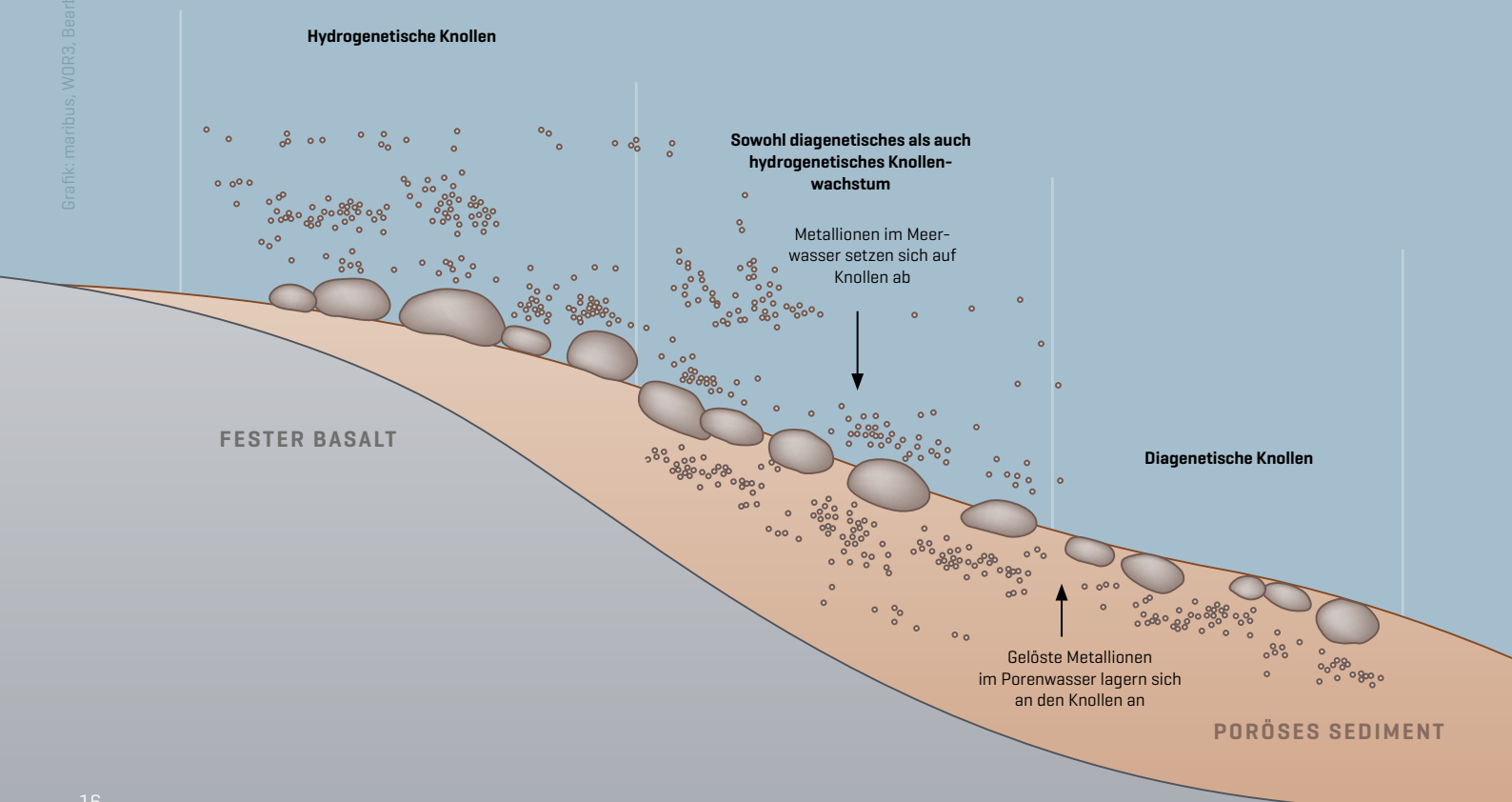
Schnitt durch eine Manganknolle

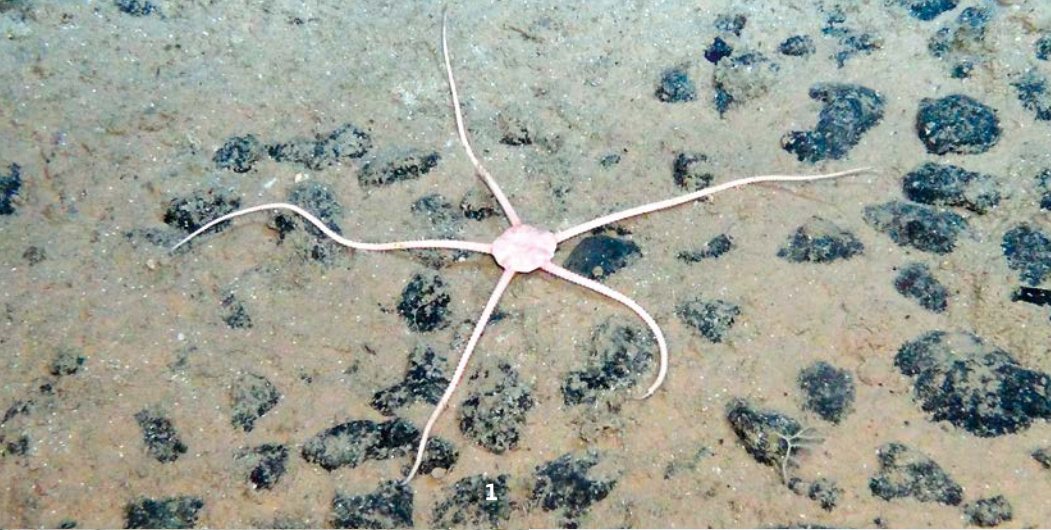
Im Inneren weisen sie, ähnlich den Wachstumsringen eines Baumes, einen schaligen Aufbau auf, der auch als geologisches Archiv genutzt werden kann. Foto: Linda Plagmann



Unterschiedliches Wachstum

Manganknollen können hydrogenetisch oder diagenetisch wachsen, aber auch beides kombinieren. Unterschiedliche Wachstumsraten können zu asymmetrischen Knollen führen. Foto: BGR





1



2

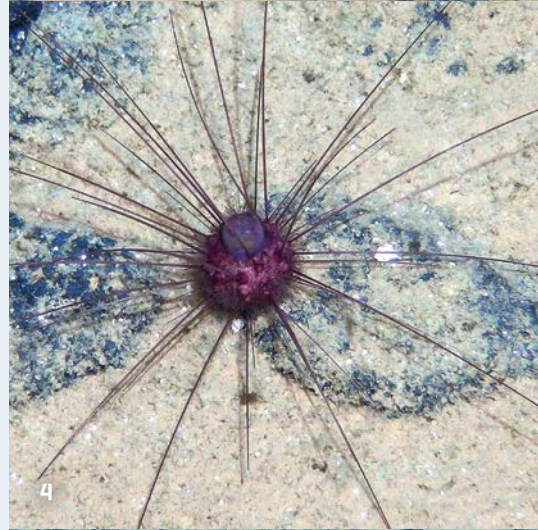


3

Biodiversität

Noch im 19. Jahrhundert glaubte man, dass unterhalb von 1.000 Metern Wassertiefe kein Leben möglich sei. Doch auch heute noch hält die Tiefsee Überraschungen für die Wissenschaft bereit. So hat sich bis in die Gegenwart die Vorstellung gehalten, dass die großen Tiefsee-Ebenen im zentralen Pazifik sehr gleichförmig und nur dünn besiedelt seien. Wieder ein Irrtum, wie Forscherinnen und Forscher des europäischen Projektes *MiningImpact* herausfanden: Die ökologische Vielfalt dort ist enorm, besonders an den Stellen, wo viele Manganknollen auf dem Meeresboden liegen: Schlangenstern [1], Seeanemone [2], Seestern [3], Seeigel [4], Weichkoralle [5] Schwamm [6] und Seegurke [7].

Fotos: ROV-Team / GEOMAR



4



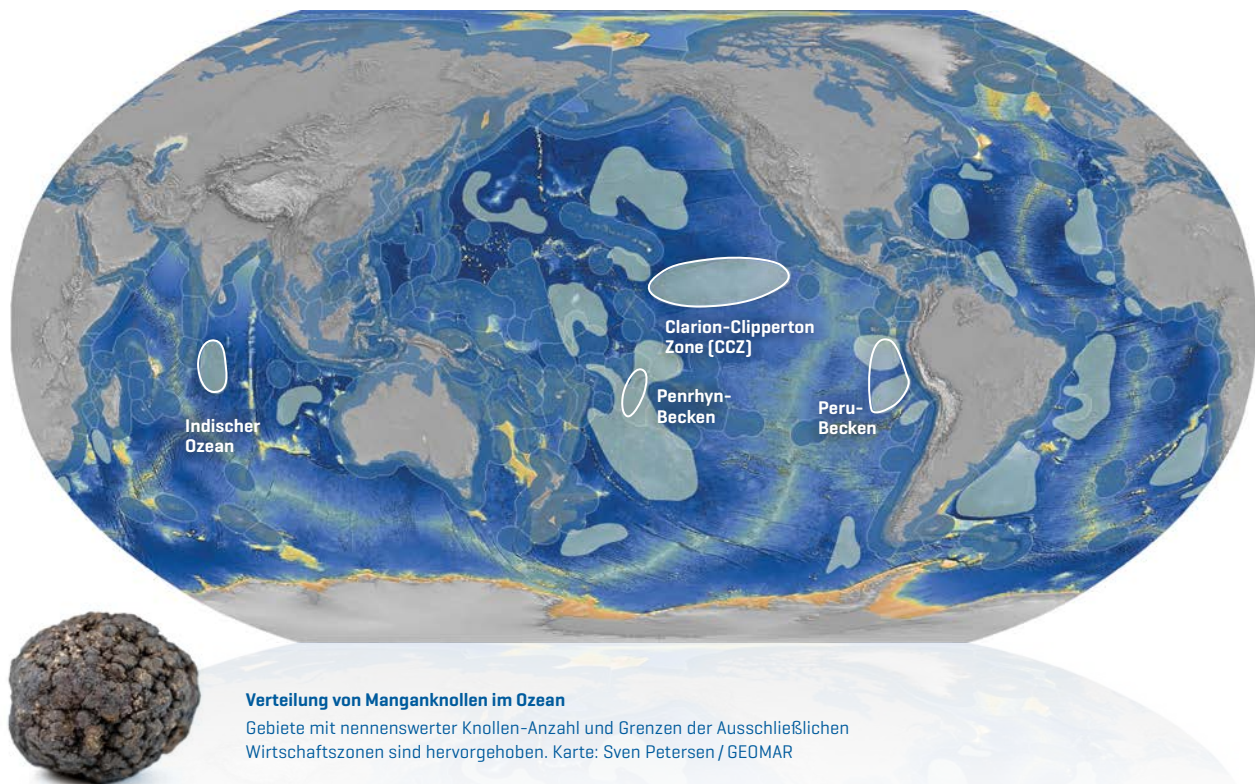
5



6



7



Vorkommen und Rohstoffpotenzial von Manganknollen

Obwohl in allen Ozeanen vorhanden, ist nur in wenigen Gebieten die Dichte von Manganknollen groß genug für einen industriellen Abbau. In diesen Gebieten könnten die Vorkommen für eine zukünftige globale Rohstoffsicherung von Bedeutung sein. Anträge für einen Abbau gibt es aber noch nicht, was auch daran liegt, dass die Regularien für eine umweltschonende Förderung derzeit von der Internationalen Meeresbodenbehörde entworfen werden.

Weltweit sind circa 38 Millionen Quadratkilometer für die Bildung von Manganknollen geeignet. Dies ist aber nur eine grobe Schätzung, da große Bereiche des Meeresbodens nur unzureichend erforscht sind. In nennenswerter Menge kommen sie in vier Meeresregionen vor:

Clarion-Clipperton-Zone (CCZ): Diese Zone ist das weltweit größte Manganknollengebiet mit einer Fläche von rund 9 Millionen Quadratkilometern, was in etwa der Größe Europas entspricht. Die CCZ liegt im Pazifik und erstreckt sich von der Westküste Mexikos bis nach Hawaii. Die Manganknollen sind hier nicht gleichmäßig verteilt. An manchen Stellen liegen sie dicht an dicht. In anderen Arealen kommen gar keine Knollen vor. Durchschnittlich findet man in der CCZ pro Quadratmeter etwa 15 Kilogramm Manganknollen. Besonders ergiebige Gebiete bringen es auf 75 Kilogramm. Insgesamt rechnet man hier mit einer Manganknollenmasse von rund 21 Milliarden Tonnen.

Peru-Becken: Etwa 1.000 Kilometer vor der peruanischen Küste liegt das Peru-Becken. Es ist etwa halb so groß wie die Clarion-Clipperton-Zone. Hier findet man pro Quadratmeter durchschnittlich zehn Kilogramm Manganknollen. (Siehe auch Projekt DISCOL auf Seite 32)

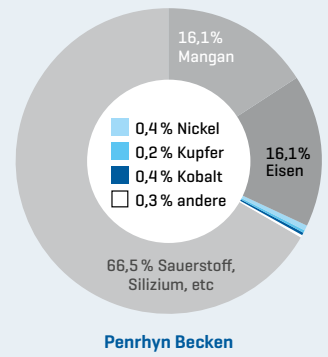
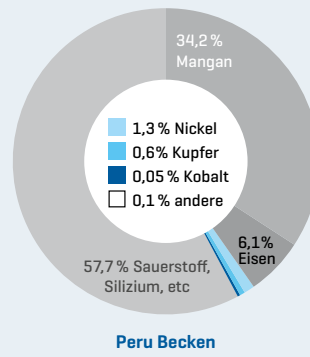
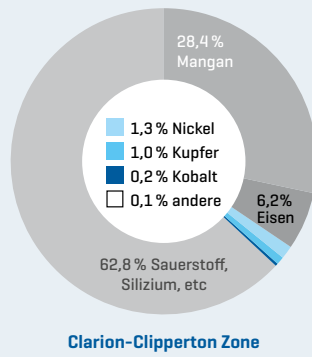
Penrhyn-Becken: Das dritte bedeutende Manganknollengebiet im Pazifik befindet sich in

unmittelbarer Nähe der Cookinseln, mehrere Tausend Kilometer östlich von Australien. Es hat eine Fläche von ungefähr 750.000 Quadratkilometern. Große Bereiche in den Küstengewässern der Cookinseln weisen Gehalte von über 25 Kilogramm Manganknollen pro Quadratmeter Meeresboden auf.

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

Mangan und Eisen sind die dominanten Metalle in Manganknollen. Die wirtschaftlich interessantesten Metalle sind jedoch Nickel, Kupfer und Kobalt, die zusammen Gehalte von etwa zwei bis drei Gewichtsprozent erreichen. Zusätzlich sind Spuren einer ganzen Reihe von Metallen in den Knollen enthalten, die für die Wirtschaft in der Hochtechnologie sowie in grünen Technologien von Bedeutung sind. Dazu gehören zum Beispiel Molybdän, die Seltenen Erden, aber auch Lithium oder Titan.

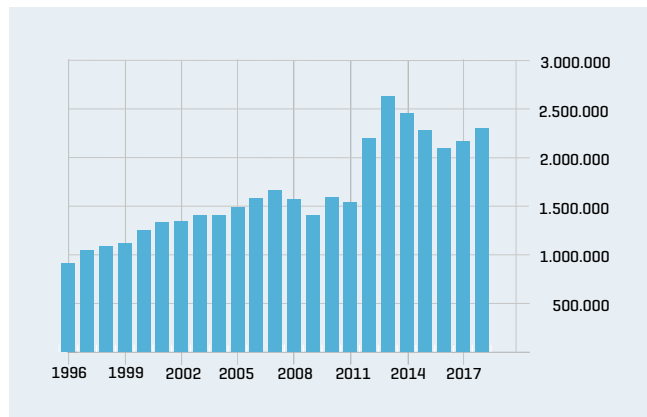
Wie chemische Analysen von Manganknollen zeigen, unterscheiden sich Manganknollen der verschiedenen Meeresgebiete deutlich in ihren Metallgehalten. Quelle: Hein & Petersen, World Ocean Review 3



Eine konservative Mengenkalkulation für die Manganknollen der CCZ geht von über 6 Milliarden Tonnen Mangan aus und überschreitet damit die an Land weltweit wirtschaftlich abbaubare Menge. Ähnlich sieht es bei Nickel (270 Millionen Tonnen), Kupfer (230 Millionen Tonnen) und Kobalt (44 Millionen Tonnen) aus. In den Manganknollen der CCZ alleine liegen damit drei- bzw. fünfmal mehr Nickel und Kobalt als in allen bekannten wirtschaftlich abbaubaren Landvorkommen zusammen. Die Menge an Kupfer in der CCZ entspricht in etwa einem Drittel der globalen Landreserven. Mit diesen Zahlen wird deutlich, dass Manganknollen ein riesiges Potential haben und für eine zukünftige globale Rohstoffsicherung von Bedeutung sein könnten. Allerdings müssen für eine wirtschaftliche Förderung rund 2 bis 3 Millionen Tonnen Manganknollen pro Jahr geerntet werden. Dafür müsste eine Tiefseebergbau-Firma eine Abbaufäche von 200 bis 300 Quadratkilometern pro Jahr bearbeiten. Das entspricht in etwa der Fläche Münchens. Bezogen auf die weltweiten Produktionszahlen in den letzten Jahren, trüge der Abbau von Manganknollen auf fünf Abbaufächen mit 10 Prozent zur globalen Produktion von Nickel bei, mit 25 Prozent bei Kobalt und weniger als 1 Prozent bei Kupfer. Unter den heutigen wirtschaftlichen Bedingungen würde durch diese Produktionsmengen allerdings der Weltmarkt mit Mangan so übersättigt werden, dass der Preis für Manganknollen eventuell insgesamt zusammenbräche.

Bei den Vorkommen in der CCZ muss berücksichtigt werden, dass große Bereiche der CCZ für einen kommerziellen Abbau nicht in Frage kommen, da sie zu geringe Mengen an Manganknollen aufweisen oder durch ihr starkes Relief ungeeignet sind.

Das zunehmende Interesse an Manganknollen zeigt sich in der Zunahme von Anträgen auf Erkundungslizenzen in der Tiefsee. 2001 wurden die ersten Lizenzen der IMB an sechs Vertragspartner vergeben. 2002 kam Indien hinzu, gefolgt von Deutschland, das seit 2006 eine Lizenz in der CCZ hält. Nach einer Phase der Ruhe hat sich inzwischen das Interesse ab 2012 deutlich erhöht. Zurzeit sind 17 Erkundungslizenzen mit insgesamt 1,2 Millionen Quadratkilometer vergeben worden (siehe auch Seite 28-29).



Globale Produktion von Nickel in den Jahren 1996 bis 2018 in Tonnen.

Quelle: USGS Mineral Commodity Summaries for Nickel [1997-2019]



Erste Versuche in den 1970er Jahren haben im Prinzip gezeigt, dass eine Förderung von Manganknollen aus großen Tiefen möglich ist. Allerdings ist es ein weiter Schritt von mehrtägigen Tests zu einer industriellen Förderung über viele Monate im Jahr. Die Auswirkungen eines groß angelegten Abbaus auf die Umwelt sind noch nicht ausreichend untersucht, auch wenn wissenschaftliche Großprojekte sich in den letzten Jahren intensiver damit beschäftigt haben. Bei der derzeitigen Marktlage würde sich der Manganknollenabbau nur für wenige Firmen lohnen, da sonst der Weltmarktpreis für Mangan zusammenbräche, der zurzeit für die Wirtschaftlichkeit relevant ist.

Die Grimaldi-Seamounts im tropischen Atlantik

Rund 800 Kilometer westlich des westafrikanischen Staats Guinea erheben sich diese Seeberge über 3.000 Meter vom ca. 4.000 Meter tiefen Ozeanboden. Sie sind Teil der Bathymetrist Seamounts, einer Kette von Unterwasservulkanen, die vor weniger als 60 Millionen Jahren entstanden ist.

Visualisierung: Nico Augustin, GEOMAR

Kobaltkrusten

Metallischer Schatz am Hang der Seeberge

Durch vulkanische Aktivität am Meeresboden sind in Millionen Jahren Seeberge, auch Seamounts genannt, in die Höhe gewachsen. Seamounts kommen in allen Meeren vor und erreichen eine Höhe von 1.000 bis 4.000 Metern. An ihnen bilden sich oft steinharte, metallhaltige Beläge, die in der Fachwelt als kobaltreiche Eisenmangankrusten oder auch kurz Kobaltkrusten bekannt sind.

KURZSTECKBRIEF KOBALTKRUSTEN	
Hauptvorkommen	Sedimentfreie Hänge von alten submarinen Vulkanen
Wassertiefe	800 bis 2.500 Meter
Hauptbestandteile	Silikate, Mangan- und Eisenoxide
wirtschaftlich interessante Metalle	Kobalt, Nickel, und Seltene Erden [in Spuren auch Molybdän, Tellur, Zirkon und Platin]
Anwendung	High-Tech-Metalle, Umwelt- und Energietechnik

Rund 33.000 Seamounts gibt es in allen Meeren – wahrscheinlich. Denn die Ozeanböden sind bei Weitem nicht so genau kartiert wie die Kontinente. Die Zahl beruht auf Hochrechnungen bisher bekannter Strukturen. Es gibt also noch viele Chancen auf Neuentdeckungen.

Die Kobaltkrusten an den sedimentfreien Flanken der Seeberge entstehen ähnlich wie Manganknollen, indem sich im Laufe von Jahrmillionen Metallverbindungen im Wasser auf dem Gestein ablagern. Wie bei den Manganknollen läuft diese Ablagerung ausgesprochen langsam ab: Pro Million Jahre wachsen die Krusten 1 bis 5 Millimeter und damit sogar noch langsamer als die Manganknollen. Auch Kobaltkrusten gelten als mögliche untermeerische Erzlagerstätten. Da sie aber fest mit dem felsigen Untergrund verbunden sind, können sie nicht wie Manganknollen vom Meeresboden aufgelesen werden.



Bruchstück einer Kobaltkruste

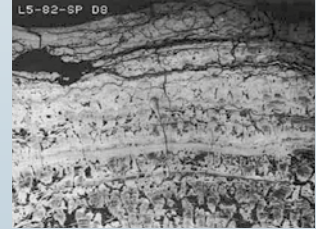
Die Probe wurde Anfang 2018 während der Expedition MSM70 mit dem Forschungsschiff MARIA S. MERIAN am Carter Seamount [einem Teil der Bathymetrist Seamount Chain] aus einer Tiefe von 2.750 bis 2.450 Metern Metern genommen. Foto: Jan Steffen/GEOMAR

Entstehung von Kobaltkrusten

Kobaltkrusten entstehen auf allen freiliegenden Gesteinsoberflächen an untermeerischen Erhebungen, vor allem auf Seamounts. Die Gesteinsoberflächen nehmen Metalle aus dem umgebenden Meerwasser auf und bilden in einem langen Zeitraum von Millionen Jahren daraus Beläge aus Eisen- und Manganoxiden, deren Dicke, abhängig vom Alter der Seeberge, von wenigen Millimetern bis zu ein paar Dezimetern reicht.

Zum Teil wirken Seamounts wie gigantische Rührstäbe im Meer, die große Wirbel erzeugen, in denen auch Metallverbindungen enthalten sind, die sich dann auf dem Gestein ablagern. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Bildung von Kobaltkrusten ist, dass der Fels oder die aufwachsenden Krusten frei von Ablagerungen sind. Auch hierfür sind die Bedingungen an Seebergen ideal: Die Strömungen tragen die feinen Sedimente fort und halten das Gestein und die Krusten frei. Kobaltkrusten findet man in Tiefen von 600 bis 7.000 Metern. Die dicksten und wertstoffreichsten Krusten befinden sich allerdings im oberen Bereich der Seeberghänge, die gut angeströmt werden. Im Durchschnitt liegen diese in Wassertiefen von 800 bis 2.500 Metern in der Nähe der Sauerstoffminimumzone.

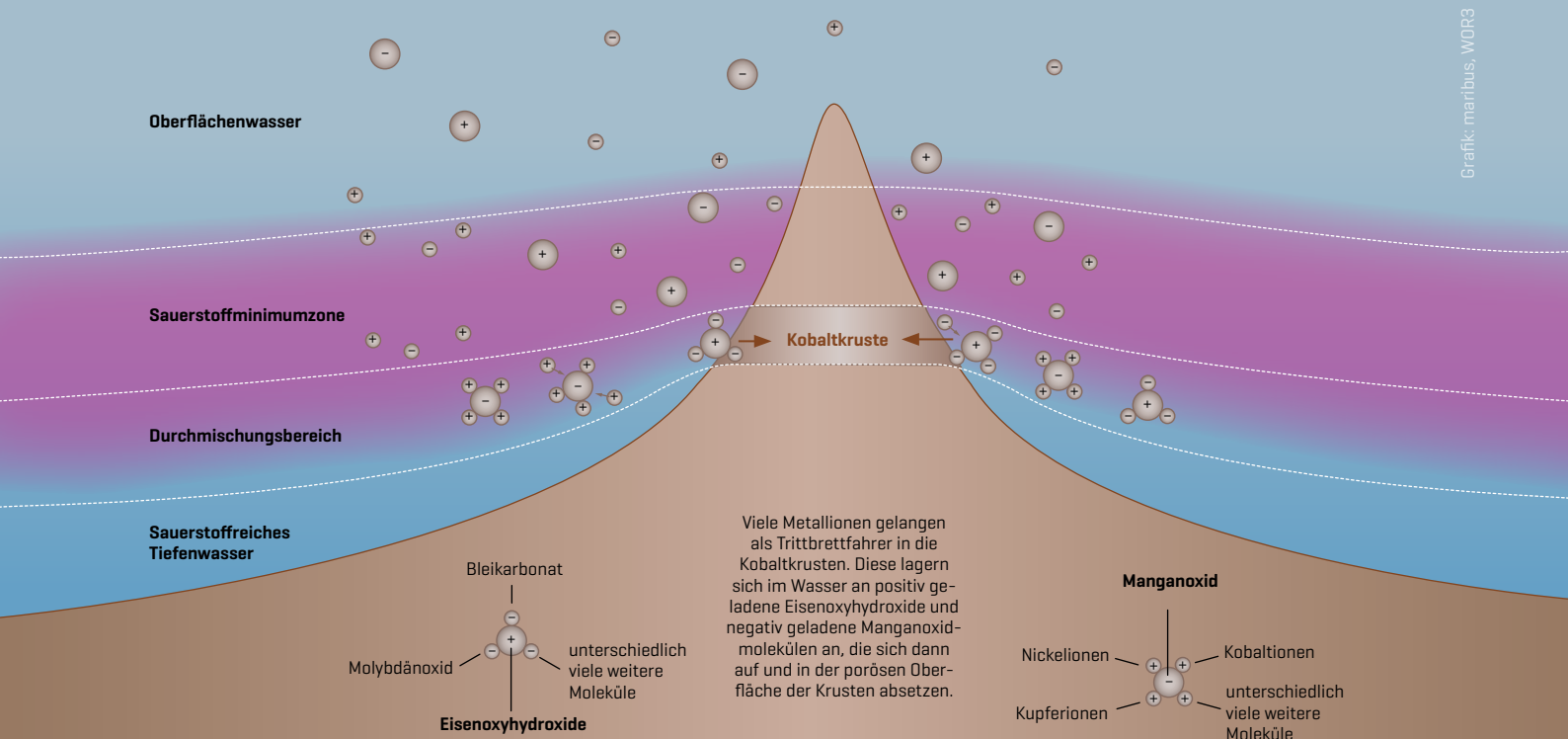
Die Kobaltkrusten bilden sich, wenn Metallionen im Wasser mit Sauerstoff zu Oxiden reagieren, die sich auf dem Fels der Seeberge ablagern. Oxide können sich aber nur dort bilden, wo das Meerwasser ausreichend Sauerstoff enthält. Paradoxe Weise aber finden sich an Seebergen die mächtigsten Kobaltkrusten in der Nähe der Sauerstoffminimumzone, in der das Meerwasser am wenigsten Sauerstoff enthält. Dieser Widerspruch lässt sich allerdings auflösen: Da in der Sauerstoffminimumzone sehr wenig Sauerstoff vorhanden ist, reichern sich die freien Ionen im sauerstoffarmen Wasser an. An Seamounts aber strömt sauerstoffreiches Tiefenwasser vom Meeresboden empor. So entsteht ein Durchmischungsbereich, in dem sich Oxide bilden können, die sich dann als Niederschlag auf den Gesteinsoberflächen absetzen und im Laufe der Zeit die Krusten bilden.



Komplexe innere Struktur

Ähnlich wie ein Schwamm oder Aktivkohle, die oft als Filtersubstanz im Aquarium eingesetzt wird, sind Kobaltkrusten sehr porös. Dank dieser vielen nur wenige Mikrometer kleinen Poren haben die Krusten eine große innere Oberfläche. So wie in den Poren eines Aktivkohlefilters Schadstoffe hängen bleiben, lagern sich an der großen Oberfläche der Krusten Metallverbindungen ab.

Foto: James Hein / USGS





1



2

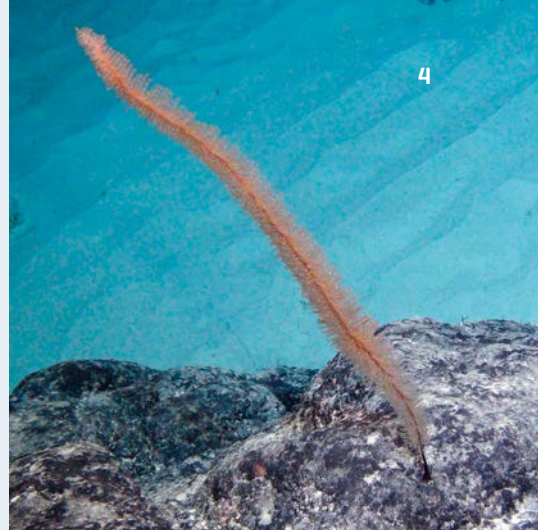


3

Biodiversität

Die Artenzusammensetzung an Seebergen unterscheidet sich von Meeresgebiet zu Meeresgebiet deutlich. Die hier gezeigten Aufnahmen zeigen Organismen an Seamounts in der Clarion-Clipperton-Zone im Zentralpazifik: Tiefseekrebs [1], Weichkoralle [2], Anemonen und Entenmuscheln [3], Antipatharia Koralle [4], Garnele [5] Gestielter Schwamm [6] und Seegurke [7]

Die große Artenvielfalt an Seamounts ist auf die besonderen Meeresströmungen zurückzuführen: Zum einen werden Nährstoffe durch die kreisenden Strömungen am Seeberg gehalten, zum anderen wird nährstoffreiches Wasser durch die Strömungen an den Seebergen aus der Tiefe heraufbefördert, was zu verstärktem Planktonwachstum führt. Fotos: ROV-Team / GEOMAR



4



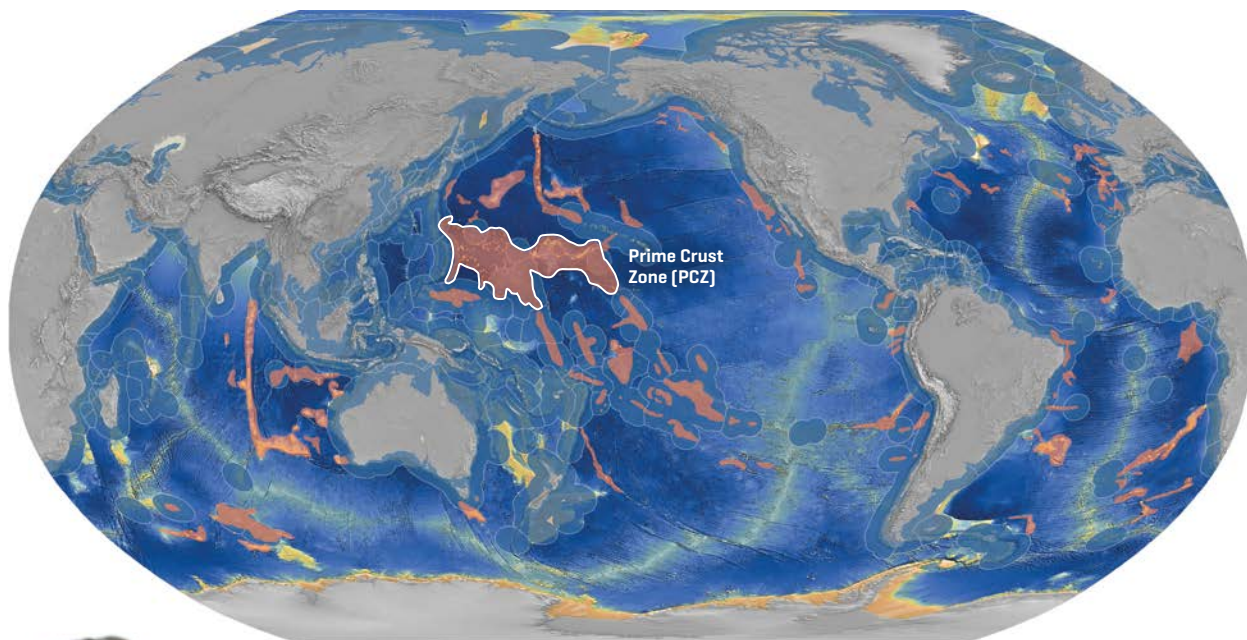
5



6



7



Verteilung von Kobaltkrusten im Ozean

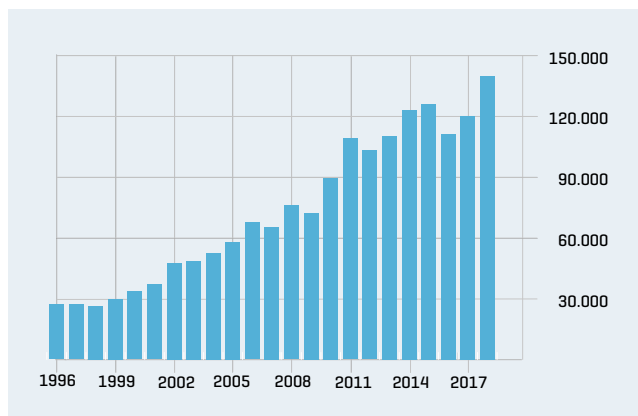
Gebiete von besonderem wirtschaftlichem Interesse und Grenzen der Ausschließlichen Wirtschaftszonen sind hervorgehoben. Im Gegensatz zu den Manganknollen treten die Krusten vermehrt innerhalb der 200-Seemeilen-Zonen der jeweiligen Anrainerstaaten auf. Karte: Sven Petersen / GEOMAR

Vorkommen und Rohstoffpotenzial von Kobaltkrusten

Weltweit sind etwa 23 Millionen Quadratkilometer für die Bildung von wirtschaftlich interessanten Kobaltkrusten geeignet. Diese Fläche lässt sich mit Hilfe einer Kombination von Faktoren aus Topographie und Morphologie des Meeresbodens, des Alters der Ozeankruste und globaler Sedimentationsraten weiter eingrenzen, so dass sich eine Fläche von etwa 3 Millionen Quadratkilometern ergibt, die für die Erkundung von Kobaltkrusten von gesteigertem Interesse sein könnte.

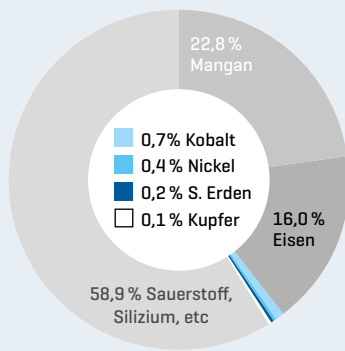
Wirtschaftlich interessante Krusten mit Dicken von über vier Zentimetern und erhöhten Wertmetallgehalten bilden sich überwiegend an den durch Strömungen sedimentfrei gehaltenen Hängen alter Seamounts in Wassertiefen zwischen 800 und 2.500 Metern. Experten schätzen, dass es weltweit mindestens 33.000 Seeberge gibt. Davon kommen etwa 57 Prozent im Pazifik vor. Der Pazifik ist somit die wichtigste Kobaltkrustenregion der Welt, besonders interessant ist der Westpazifik. Hier findet man die ältesten Seeberge, die bereits vor rund 150 Millionen Jahren entstanden sind. Entsprechend viele Metallverbindungen konnten sich hier im Laufe der Zeit ablagern und vergleichsweise dicke Krusten bilden. Primäre Krustenzone (Prime Crust Zone, PCZ) wird das Gebiet rund 3.000 Kilometer südöstlich von Japan genannt.

Wie bei den Manganknollen machen die in den Kobaltkrusten angereicherten Metalle Mangan und Eisen den Hauptanteil aus. Die wirtschaftlich interessanten Metalle sind Kobalt, Nickel und Seltene Erden. Kobalt ist das derzeit wichtigste Spurenmetall und erreicht oft Gehalte über 0,5 Prozent. Die



Globale Produktion von Kobalt in den Jahren 1996 bis 2018 in Tonnen.

Der Anstieg des Bedarfs zeigt die vermehrte Verwendung von Kobalt in Lithium-Ionen-Akkus [zum Beispiel für elektrische Fahrzeuge] auf. Quelle: USGS Mineral Commodity Summaries for Cobalt (1997-2019)



Durchschnittlicher Metallgehalt von Kobaltkrusten in der Prime Crust Zone.
 Quelle: Hein und Koschinsky, 2014



Probe aus ca. 1.700 Meter Wassertiefe von einem Seamount der Louisville-Kette im Südwest-Pazifik. Die Krusten aus dieser Region enthalten bis 1,6 Prozent Kobalt und sind signifikant angereichert an Seltenen Erden, Molybdän und Titan. Foto: BGR

Seltenen Erden sind in Mangankrusten angereichert, und ihre Konzentration liegt mit zusammen 0,16 bis 0,25 Prozent sogar über der in Manganknollen. Dies macht Kobaltkrusten zu einer interessanten Rohstoffquelle für High-Tech-Metalle und Anwendungen in der Umwelt- und Energietechnik. Andere Metalle, wie Molybdän und Tellur treten überwiegend in Spurenkonzentration von wenigen Gramm pro Tonne auf. Ob solche Konzentrationen wirtschaftlich gewinnbar sind, wird noch untersucht.

Schätzungen des Rohstoffpotentials der Krusten allein in der Prime Crust Zone gehen von über 7,5 Milliarden Tonnen aus, die etwa viermal mehr Kobalt und neunmal mehr Tellur enthalten als die bekannten Reserven an Land. Ähnlich wie bei den Manganknollen handelt es sich bei den Mangankrusten also um einen Rohstoff, dessen mariner Abbau eine sichere Versorgung der Industrie über viele Jahre ermöglichen könnte. Eine direkte Beprobung und Messung der Dicke von Kobaltkrusten ist allerdings schwierig, da Gesteinsbrocken abgerissen oder herausgebohrt werden müssen. Die lokalen Unterschiede sind kaum bekannt, und die punktuelle Untersuchung ist ausgesprochen aufwendig und teuer. Präzise Messgeräte,

die in der Tiefe die Dicke der Krusten zentimetergenau vermessen könnten und vom Fels unterscheiden können, gibt es bisher noch nicht.

Anders als bei den Manganknollen liegen die meisten ergiebigen Krustenvorkommen auch nicht in den internationalen Gewässern der Hohen See, sondern in den Ausschließlichen Wirtschaftszonen verschiedener Inselstaaten. Über einen zukünftigen Abbau können dort nur die jeweiligen Regierungen bestimmen. Konkrete Pläne gibt es derzeit aber in keinem dieser Länder. Für die Krustenvorkommen in internationalen Gewässern gibt es seit 2012 ein verbindliches Regelwerk der Internationale Meeresbodenbehörde zur Exploration. Seitdem haben bereits China, Japan, Brasilien, Russland und seit 2018 auch Korea Erkundungslizenzen für kobaltreiche Mangankrusten erworben. Es liegen jedoch nur Konzepte für mögliche Abbaugeräte vor, und Tests haben bisher nicht stattgefunden.



Kobaltkrusten sind eine vielversprechende Ressource am Meeresboden, da sie große Mengen an Kobalt, Nickel, Mangan und anderen Metallen enthalten, die die Gehalte in Landlagerstätten zum Teil übertreffen könnten. Allerdings gibt es nur wenige Vorkommen in internationalen Gewässern, für die Erkundungslizenzen beantragt wurden. Da Kobaltkrusten fest mit dem felsigen Untergrund verbunden sind, können sie nicht einfach wie Manganknollen vom Meeresboden aufgelesen werden, vielmehr müsste man sie aufwendig vom Untergrund abtrennen. Die Umweltauswirkungen eines Abbaus werden als ähnlich gravierend angenommen wie bei Massivsulfiden und Manganknollen, allerdings wären, im Vergleich zu Manganknollen, nur kleinere Abbauflächen betroffen.

Der Tiefseeroboter ROV KIEL 6000
entnimmt während einer *MiningImpact*-
Expedition mit einem Greifarm eine mit
einem Schwamm bewachsene Mangan-
knolle zur späteren Analyse im Labor.
Foto: ROV-Team, GEOMAR



Umweltschädigungen durch Tiefseebergbau

Die Erzvorkommen der Tiefsee unterscheiden sich zwar in vielerlei Hinsicht, wie zum Beispiel in ihrer flächigen Ausdehnung, der chemischen Zusammensetzung und ihrem biologischem Habitat. Dennoch lassen sich grundlegende Umweltauswirkungen definieren.

Mit den derzeit diskutierten Abbaumethoden (siehe auch Seite 30-31) wird bei der Förderung der Metallerze die Meeresbodenoberfläche mitsamt der darauf lebenden Fauna entfernt. Zudem wird von den Abbaugeräten das Sediment am Meeresboden sowie kleingeriebenes Erzmaterial aufgewirbelt. Hierdurch entstehen Trübungswolken aus kleinsten Partikeln, nur wenige Hundertstel eines Millimeters groß, die durch die Bodenströmungen auch außerhalb des Abbaubereichs verdriftet werden und sich dort auf dem Meeresboden und seiner Fauna ablagern. Somit ist die geschädigte Fläche des Meeresbodens um ein Vielfaches größer als die eigentliche Abbaufäche.

Die Umweltschädigungen durch Tiefseebergbau sind nachhaltig für viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Die Schädigungen bestehen vor allem im Verlust des Habitats am Meeresboden, in stark verringerten Populationsdichten in allen Faunenklassen von Mikroorganismen bis Megafauna, in einer veränderten Zusammensetzung der Faungemeinschaften und in reduzierten Ökosystemfunktionen, wie Produktivität und Nährstoffflüssen.

Die wissenschaftlichen Untersuchungen in den letzten Jahren haben zudem gezeigt, dass die Manganknollenfelder ein ganz spezielles Tiefsee-Ökosystem darstellen. Sowohl die Artenvielfalt als auch die Menge an Organismen ist im Manganknollen-Habitat sehr viel höher als in den Tiefseegebieten ohne Manganknollen.



Mit Sediment bedeckter Schwamm im DISCOL-Gebiet. Dort wurden 1989 Störungen durch den Tiefseebergbau simuliert. Schwämme sind wichtige Wirtsorganismen für mobile Tiere, wie Schlangensterne, Isopoden oder Seepocken, und tragen erheblich zu den Nährstoffkreisläufen in benthischen Ökosystemen im Meer bei. Die Fotos wurden 2015 während der SONNE-Expedition S0242 mit ROV KIEL 6000 aufgenommen.



Manganknollen am Meeresboden des Pazifischen Ozeans bilden ein ganz spezielles Ökosystem in der Tiefsee mit einer sehr großen Artenvielfalt und Häufigkeit an Fauna. Unter anderem bieten sie eine wichtige Brutstätte für Tiefseekraken. Die Kraken heften ihre Eigelege an gestielte Schwämme, welche nur auf den Manganknollen wachsen. Sie brüten dann vermutlich mehrere Jahre an dem Stiel hängend ihre Eier aus und sterben anschließend. Forscher hatten die bisher unbekannten Krakenarten 2015 auf Tauchexpeditionen im Peru-Becken in einer Tiefe von mehr als 4.000 Metern beobachtet – ein neuer Tiefenrekord für diese Art. Ihre spezielle Abhängigkeit von Manganknollen als Brutstätte belegt, dass einem industriellen Abbau von Wertstoffen in der Tiefsee gründliche Untersuchungen zu den ökologischen Folgen vorausgehen müssen. Foto links: ROV-Team / GEOMAR, Foto rechts: AWI-OFOS Launcher team

Regeln für den Abbau

In den 1970er Jahren gab es erstmals großes Interesse an den Rohstoffen der Tiefsee. Diese Phase der Euphorie und die Furcht vor einer Ausbeutung der Meere durch die Industrieländer auf Kosten der Allgemeinheit mündeten letztendlich 1982 in das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen, der „UN Convention on the Law Of the Sea“ [UNCLOS], in der die Ressourcen der Tiefsee als gemeinsames Erbe der Menschheit definiert wurden. 1994 riefen dann die Vereinten Nationen die Internationale Meeresbodenbehörde [International Seabed Authority – ISA], ins Leben, um marinen Bergbau zu verwalten und zu regulieren.

Ausschließliche Wirtschaftszonen und „The Area“

Nach den in UNCLOS festgelegten Regularien darf ein Abbau nur stattfinden, wenn er allen zu Gute kommt. Aus diesem Grunde wurde die Verfassung für die Meere so angepasst, dass ein Küstenstaat neben seinen Territorialgewässern (12-Meilen-Zone) auch Zugriff in der Ausschließlichen Wirtschaftzone (Exclusive Economic Zone – EEZ) hat. Innerhalb dieser erweiterten Zone mit einer Ausdehnung von 200 Seemeilen hat ein Land Zugriff auf die Wassersäule und den Meeresboden. Alles, was außerhalb der nationalen Gesetzgebung ist, nennt sich „The Area“. Dieses Gebiet gilt nach Artikel 136 des Seerechtsübereinkommens der UN als „Gemeinsames Erbe der Menschheit“. Hier beginnt die Zuständigkeit der Internationalen Meeresbodenbehörde zur Vergabe von Erkundungs- und zukünftig auch Abbaulizenzen. Von der Gesamtfläche des Ozeans sind aktuell 50 Prozent unter internationaler UN-Gesetzgebung, 41 Prozent sind Ausschließliche Wirtschaftszonen und 9 Prozent fallen unter die derzeit eingereichten Anträge zur Erweiterung des Festlandssockels. Was die marinen Rohstoffe betrifft, steht also nur noch die Hälfte des Ozeans unter internationaler Verwaltung.

Die Internationale Meeresbodenbehörde (IMB)

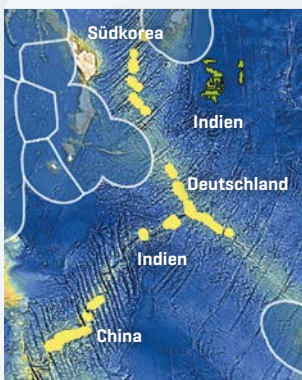
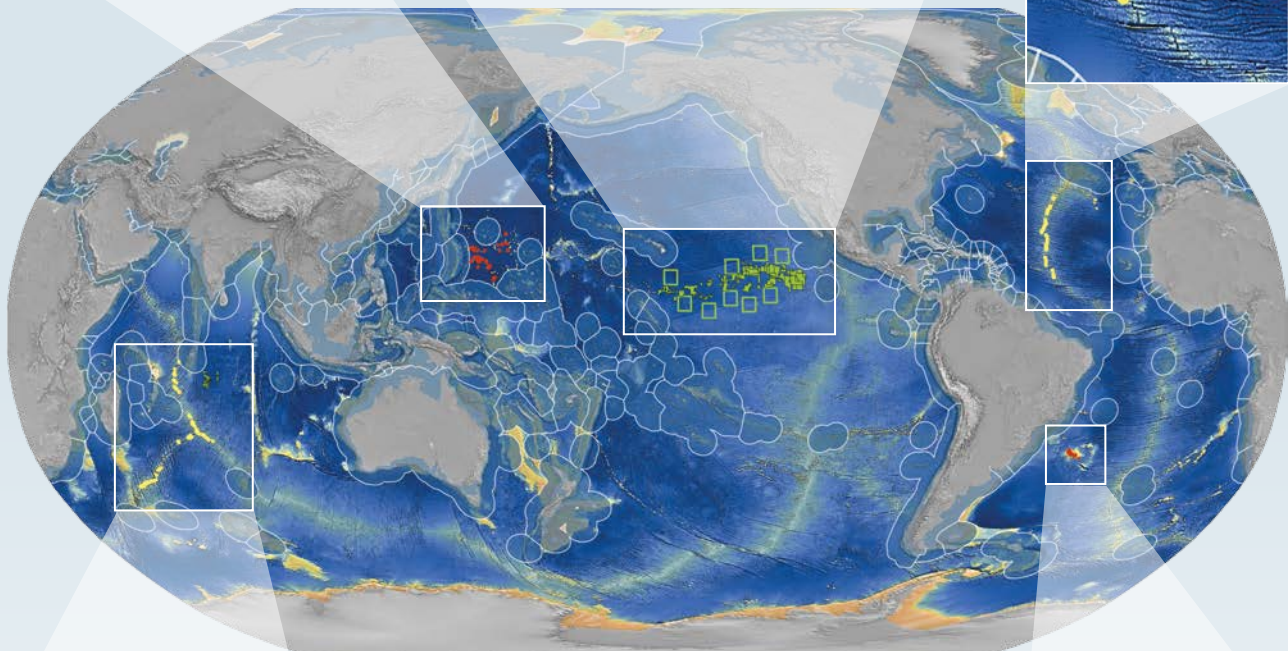
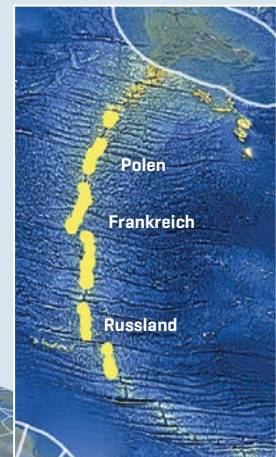
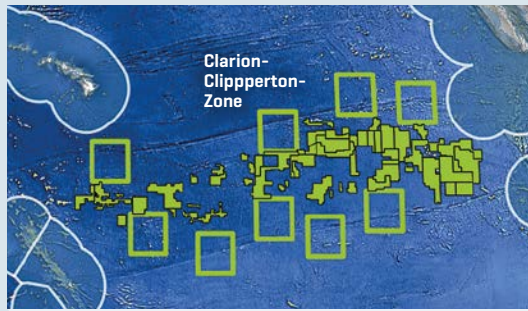
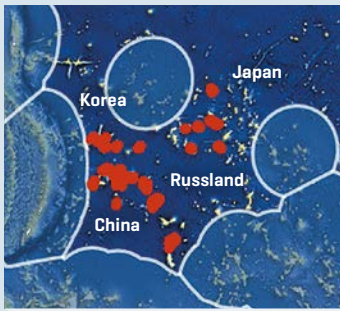
Die IMB mit Sitz in Jamaica ist eine eigenständige internationale Organisation mit derzeit 168 Mitgliedsländern und der EU. Sie reguliert und überwacht alle Aktivitäten zur wirtschaftlichen Nutzung des internationalen Meeresbodens und dessen Untergrundes. Die IMB entwickelt aktuell den sogenannten „Mining Code“, den Bergbau-Kodex. Dieser wird den Abbau von mineralischen Erzen im Meeresboden in „The Area“, also außerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen, regulieren. In der jetzigen Entwurfsfassung von 2019 sind auch die Vorschriften enthalten, um die einzuhaltenden Umweltstandards und -Grenzwerte sowie die Umweltüberwachung des Abbaus zu regeln.

Aufteilung der Rohstofflizenzegebiete

Da bisher noch kein Tiefseebergbau erlaubt ist, besteht die zentrale Aufgabe der IMB darin, Explorationslizenzen zu verwalten, die Regularien für Exploration zu aktualisieren und Regeln für den Abbau zu entwickeln. Einen Antrag auf eine Explorationslizenz können sowohl staatliche als auch private Unternehmen stellen. Die Lizenzanträge müssen von ihrem Heimatstaat befürwortet werden. Der befürwortende Staat, der ein geeignetes Meeresbergbaurecht in Kraft gesetzt haben muss, prüft die Einhaltung der Eignungsanforderungen sowie die finanzielle und technische Leistungsfähigkeit des Unternehmens. Er ist zur aktiven Überwachung verpflichtet und haftet für diese Tätigkeit.

Bislang wurden 29 Lizenzen zur Exploration vergeben, 17 für Manganknollen, 7 für Massivsulfide und 5 für Kobaltkrusten. Die Lizenznehmer kommen aus 20 verschiedenen Ländern, davon 12 aus Asien, 12 aus West- und Osteuropa, 4 von pazifischen Inselstaaten und einer aus Südamerika. Von den 17 Lizenzgebieten für Manganknollen liegen 16 Gebiete in der Clarion-Clipperton-Zone im Ostpazifik, die wegen ihrer reichen Manganknollenvorkommen mit hohen Metallgehalten als wirtschaftlich interessanteste Region für diesen Rohstoff gilt. Das Lizenzgebiet Indiens befindet sich im zentralen Indischen Ozean. Drei Lizenzgebiete für Massivsulfide befinden sich am mittelozeanischen Rücken des Nordatlantiks und vier Gebiete am Südwestindischen und Zentralindischen Rücken. Von den fünf Lizenzgebieten für Kobaltkrusten befinden sich vier im Nordwestpazifik und eines im Südatlantik vor Brasilien.

Jede Explorationslizenz hat eine Laufzeit von 15 Jahren mit der Möglichkeit, die Lizenz mehrfach um jeweils 5 Jahre zu verlängern. Sie gewährt zugleich ein Vorrecht auf späteren Abbau und berechtigt auch zum Testen von Technik, beispielsweise für den Abbau. Die Verträge enthalten Arbeitspläne für die gesamten 15 Jahre, die nach jeweils 5 Jahren aktualisiert werden müssen und von den Lizenznehmern umzusetzen sind. Zum Nachweis ist jeder Lizenznehmer verpflichtet, jährlich einen Bericht über seine Explorationstätigkeiten bei der IMB abzugeben. Weiterhin enthalten die Verträge ein Programm zur Ausbildung von Trainees aus Entwicklungsländern durch die Lizenznehmer.



Aktuelle Lizenzgebiete

Weltkarte mit den von der Internationalen Meeresbodenbehörde bisher vergebenen Explorationsgebieten für Manganknollen (grün), Kobaltkrusten (rot) und Massivsulfide (gelb). Die ausschließlichen Wirtschaftszonen der Küstenstaaten sind weiß umrandet. Die vergrößerten Kartenausschnitte zeigen die fünf Regionen mit den Lizenzgebieten einschließlich der befürwortenden Staaten für Krusten und Sulfide. In der Karte der Clarion-Clipperton-Zone sind neben den Explorationsgebieten für Manganknollen in Grün auch die neun Schutzgebiete (grün umrandete Quadrate) dargestellt. Die Auswahl der Schutzgebiete wurde im Rahmen eines Umweltmanagementplans der IMB festgelegt. Karte: Sven Petersen / GEOMAR

Eine detaillierte Übersicht der internationalen Meeresbodenbehörde über die aktuellen Lizenznehmer in den einzelnen Gebieten finden Sie hier: www.isa.org.jm/contractors/exploration-areas

Abbautechnologien

Der Abbau von Rohstoffen aus der Tiefsee stellt eine sehr große technische und logistische Herausforderung dar. Bisher existieren dazu hauptsächlich Konzepte und Studien, aber nur wenige ausgereifte Geräte und Systeme. Bis zur industriellen Förderung ist noch ein weiter Weg zu beschreiten.

K Kobaltkrusten

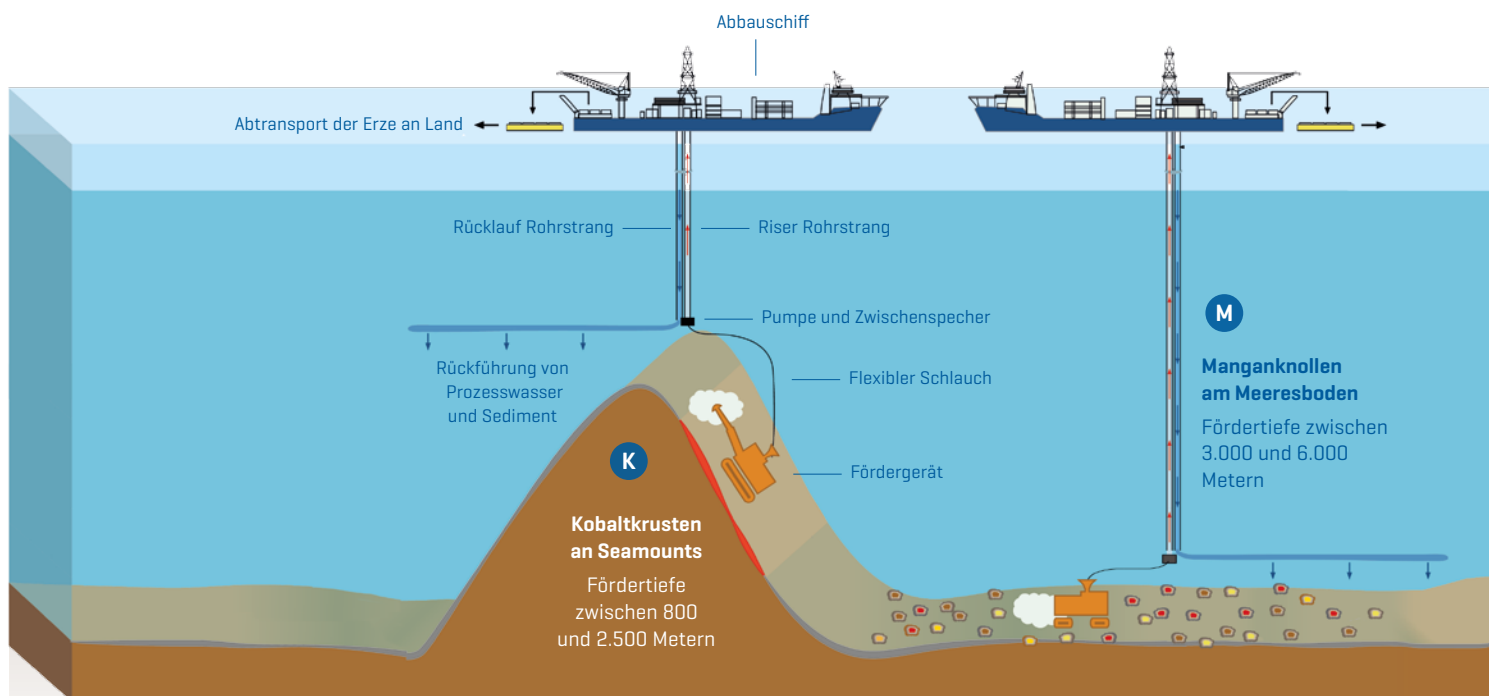
Die Anforderungen an einen Abbau von Kobaltkrusten sind nochmals höher als bei Massivsulfiden. So ist das Gelände deutlich schwieriger, und darüber hinaus müssen die Kobaltkrusten von dem unterlagernden Gestein getrennt werden, damit es nicht zu einer Verdünnung des Erzes kommt. Bisher scheinen nur Konzepte für Abbaugeräte zu existieren. Ähnlich wie bei den beiden anderen Rohstoffen soll die Förderung zum Schiff über einen pumpengestützten Rohrstrang erfolgen.

M Manganknollen

Für den Abbau von Manganknollen wurden erste Technologien bereits in den 1970er Jahren erfolgreich getestet. In modernen Konzepten erfolgt der Abbau durch sogenannte Kollektoren, also Raupenfahrzeuge, die am Meeresboden die Manganknollen aufsammeln. Die Knollen werden dann mit Pumpsystemen durch einen Rohrstrang, einen sogenannten Riser, auf das Abbauschiff transportiert. An Bord des Abbauschiffes werden die Knollen vom Wasser und den Sedimenten getrennt und danach auf Transportschiffe verladen, um das Erz an Land zur Verhüttung zu bringen. Das Prozesswasser und die Sedimente werden nahe an den Meeresboden zurückgeführt, um die Ausbreitung der Sedimentwolken zu minimieren. In den letzten Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, um diese Technik voranzubringen und Prototypen zu testen. Bisher vorhandene Abbaugeräte sind mit mehreren Metern Breite und Länge deutlich kleiner als die letztendlich einzusetzenden industriellen Kollektoren.

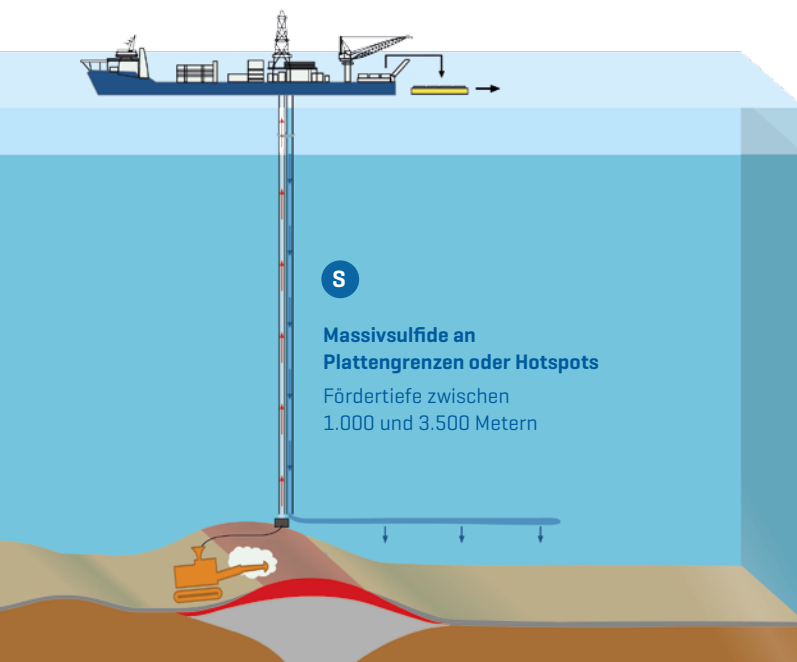
Abbautechnologien mariner mineralischer Rohstoffe

Quelle: GRID Arendal 2013 [www.grida.no/resources],
Bearbeitung: Christoph Kersten / GEOMAR



S Massivsulfide

Auch für den Abbau von Massivsulfiden sollen Crawler eingesetzt werden. Allerdings müssen diese das Material nicht nur auflesen, sondern das Gestein am Meeresboden aufbrechen. Dazu sollen u.a. Fräsen eingesetzt werden, wie sie so ähnlich auch im Tunnelbau eingesetzt werden. Darüber hinaus liegen die Massivsulfide ja oft als dreidimensionale Hügel vor. Die Abbaugeräte müssen sich also in das Gelände hineinarbeiten. Erste Abbaugeräte wurden bereits im Maßstab 1:1 gebaut und in den Hoheitsgewässern von Japan auch bereits am Meeresboden getestet. Des Weiteren wurden mehrere Abbaugeräte von einer australischen Firma fertiggestellt, die ab 2020 in den Hoheitsgewässern von Papua-Neuguinea mit dem Abbau von Massivsulfiden beginnen wollen. Allerdings gibt es zur Zeit Verzögerungen beim Bau des dazugehörigen Abbauschiffes. Ähnlich wie bei den beiden anderen Rohstoffen soll die Förderung zum Schiff über einem pumpengestützten Rohrstrang erfolgen. Die Förderung der Massivsulfide auf das Schiff ist mit derjenigen beim Abbau von Manganknollen vergleichbar.



Ablauf der Förderung in der Tiefsee am Beispiel des geplanten Abbaus von Massivsulfiden vor Papua-Neuguinea



1: Aussetzen der Crawler vom Abbauschiff, in dem sich auch Fördersystem und Erzlagerräume befinden.



2: Einsatz der Gesteinsfräse zum Aufbrechen der Massivsulfide am Meeresboden.



3: Der Kollektor sammelt die aufgebrochenen Erze und pumpt sie über den Riser zum Abbauschiff hoch.



4: Auf dem Schiff werden die Erze von Wasser und Sediment getrennt und in die Lagerräume befördert.

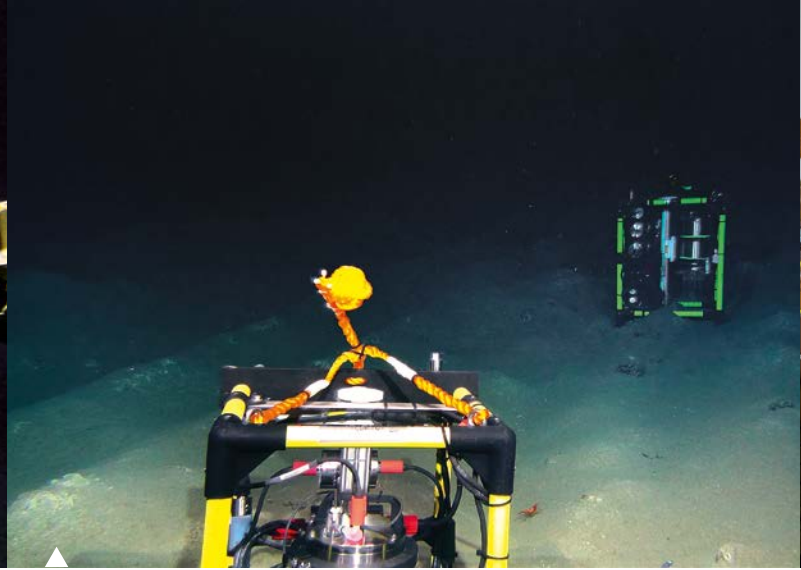


5: Die Massivsulfide werden auf ein Transportschiff umgeladen, das die Erze zur Weiterverarbeitung an Land befördert. Bildserie: © Nautilus Minerals



Ein Fahrstuhl am Meeresboden des DISCOL-Gebietes

Mit diesem Gerät können mehrere Experimente gleichzeitig am Meeresboden abgesetzt werden. Im Vordergrund: Manganknolle im Greifarm des ROV KIEL 6000. Foto: ROV-Team / GEOMAR

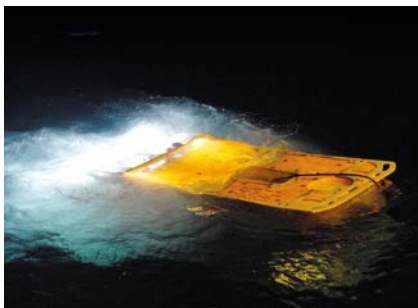


Messgeräte an einer Pflugschur

Innerhalb und außerhalb der Pflugschuren wurden unterschiedliche biologische, chemische und ozeanographische Daten erhoben. Die Untersuchungen ergaben, dass nach 26 Jahren selbst Bakterien in den Spuren immer noch etwa 30 Prozent weniger aktiv sind als im ungestörten Meeresboden. Foto: ROV-Team / GEOMAR



78-mal haben Forscher 1989 während des DISCOL-Projekts eine Pflugschur über den Tiefseeboden gezogen. Mit Hilfe des autonomen Unterwasserfahrzeugs ABYSS konnten die Forscher hochauflösende Karten erstellen, auf denen diese Spuren auch nach 26 Jahren noch genau zu erkennen sind. Quelle: GEOMAR



ROV Kiel 6000 kehrt vom Einsatz zurück. Während SO242 wurden mit dem Tauchroboter 23 Tauchgänge mit einer Gesamtzeit von über 250 Stunden durchgeführt. Foto: Peter Linke / GEOMAR

Umweltmonitoring zu Auswirkungen des Tiefseebergbaus

Welche Folgen hat der Abbau metallischer Rohstoffe in der Tiefsee für das Ökosystem? Wie können die unvermeidlichen Umweltschäden möglichst gering gehalten werden? Welche Umweltstandards und Grenzwerte können definiert werden? Und wie kann die Einhaltung von Abbauregeln überwacht werden? Das am GEOMAR koordinierte internationale Projekt *MiningImpact* mit Forschenden aus 11 europäischen Ländern zielt auf die Bewertung der langfristigen Auswirkungen und Risiken auf die Umwelt durch den Abbau von Manganknollen in der Tiefsee ab. Hierzu wurden im Jahr 2015 auf drei Expeditionen die Ökosysteme an mehrere Jahrzehnte alten Störungsspuren in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) und im DISCOL-Gebiet im Perubcken untersucht. An den Instituten entwickelte Tiefseetechnologie wurde im Jahr 2019 auf einer weiteren Expedition für die Umweltüberwachung von Tiefseebergbau-Aktivitäten getestet.

Rückblende, 1989, Projekt DISCOL (DISturbance and re-COLonisation): Deutsche Meeresforscher führen ein einzigartiges Experiment durch. Sie pflügen in einem etwa elf Quadratkilometer großen Gebiet den Meeresboden der Tiefseeebene vor Peru um. Dabei entfernen sie Manganknollen von der Oberfläche, wirbeln Sediment auf, zerstören im kleinen Rahmen auch die Fauna — sie simulieren Tiefseebergbau. Das alles dient einem wissenschaftlichen Zweck, denn die Wissenschaftler wollen herausfinden, welche ökologischen Folgen der Manganknollen-Abbau hätte, wie lange es dauert, bis sich das Ökosystem davon erholt und wie ein möglichst umweltschonendes Management der Tiefseeressourcen möglich wäre.



Erste Begutachtung von Manganknollen an Bord der SONNE

Die Manganknollen werden sowohl vermessen und gewogen als auch die auf ihnen wachsende Fauna bestimmt und gezählt. Foto: Bastian Barenbrock



Testkollektor Patania II der Belgischen Firma DEME-GSR

Die Funktion dieses Prototypen eines industriellen Manganknollenkollektors soll in den Lizenzgebieten in der CCZ getestet werden. Foto: DEME-GSR

26 Jahre später, im Jahr 2015, halfen modernste Technologien einem internationalen Forscherteam, die möglichen längerfristigen Folgen eines Abbaus einzuschätzen. Während der Expedition SO242 mit dem Forschungsschiff SONNE wurden genaue Karten der Pflugspuren am Meeresboden erstellt. Photos und Videos gaben den Forschern einen umfassenden und detaillierten Eindruck der Umweltschädigungen. Mit dem Tauchroboter ROV Kiel 6000 wurden gezielte Proben aus den Störungen genommen, mikrobiologische Aktivitäten gemessen und toxikologische Experimente am Meeresboden in mehr als 4.000 Meter Wassertiefe durchgeführt.

Die zentralen Ergebnisse dieser Untersuchungen kleiner Meeresbodenstörungen durch das Projekt MiningImpact in bezug auf den sehr viel großflächigeren industriellen Tiefsebergbau sind, dass die Umweltschädigungen nachhaltig sein werden und alle Ökosystem-Kompartimente betreffen. Für viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte wird die Zusammensetzung der Faunengemeinschaften verändert, Populationsdichten und Biodiversität der Fauna sowie Ökosystemfunktionen, wie Produktivität und mikrobielle Aktivität, werden stark reduziert.

Ein bislang schwierig zu kalkulierendes Risiko stellt die Ausbreitung der aufgewirbelten Sedimentwolken und der daraus folgenden zusätzlich geschädigten Meeresbodenfläche dar. Im Frühjahr 2019 hat MiningImpact daher umfangreiche Tests von Sensoren und Methodiken zur Umweltüberwachung in den Lizenzgebieten der CCZ durchgeführt.

Aufgrund der nachhaltigen Zerstörung des Tiefsee-Ökosystems in den Abbaugebieten und seiner Umgebung müssen die internationalen Regularien der ISA daher neben Strategien für ein umfassendes Umweltmonitoring auch Konzepte zum Umweltmanagement und adaptiver Raumplanung enthalten. Dies stellt eine große Herausforderung dar, weil die Tiefsee und insbesondere die Manganknollenhabitate hoch divers und variabel sind und dabei die Verbindung von Individuen innerhalb einer Art über große Distanzen bisher nicht verstanden ist. Das Projekt MiningImpact erarbeitet hierfür Lösungsvorschläge.



In den untersuchten Manganknollengebieten bilden gestielte Schwämme eine wichtige Habitatstruktur. Die an den Manganknollen festsitzenden Stiele dienen als Lebensraum für andere Tiefseebewohner. Vor allem Schlangensterne, Seepocken und Ruderfußkrebse leben auf diesen bis zu ein Meter langen Strukturen. Foto: ROV-Team / GEOMAR

Linktipps zum Thema



Deep Sea Minerals: A physical, biological, environmental, and technical review

Die englische Broschüren-Reihe, an der ein Netzwerk von rund 60 führender Experten beteiligt war, wurde 2013 im Rahmen des von der Europäischen Union finanzierten Projekts „Deep Sea Minerals in the Pacific Islands Region: a Legal and Fiscal Framework for Sustainable Resource Management Project“ zusammengestellt. Band 1A, B und C untersuchen die Geologie und die damit verbundene Biologie der drei wichtigsten Tiefsee-Minerallagerstättentypen im Pazifikraum und mit den ökologischen und technischen Aspekten ihrer Förderung. Band 2 befasst sich mit den sozioökonomischen, rechtlichen und steuerlichen Aspekten des Tiefsebergbaus.

Website, PDF-Download (englisch): www.grida.no/publications/184



WOR3: Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken

Der „World Ocean Review“ ist eine einzigartige Publikation über den Zustand unserer Meere und spiegelt den aktuellen Stand der Wissenschaft wider. Die 2014 erschienene dritte Ausgabe widmet sich den metallischen und energetischen Ressourcen des Meeres und ihrer Nutzung. Neben Fakten über den Abbau der bekannten Öl- und Gasvorkommen unterhalb des Meeresbodens und der Entstehung und Potenziale der Gashydratvorkommen an den Kontinentalrändern liefert der WOR3 detaillierte Informationen über Chancen und Risiken der Nutzung mineralischer Rohstoffe: Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfide.

Website, PDF-Download: <https://worldoceanreview.com/wor-3>



ESKP Themenspezial: Rohstoffe in der Tiefsee

Der Bedarf für den Ausbau der E-Mobilität, die Energiewende und für die zunehmende Digitalisierung aller Lebensbereiche erhöht sich weiter. Mit jedem Anstieg der Rohstoffpreise und der zunehmenden Nachfrage nach neuen Technologien könnte es attraktiver werden, auch im Meer nach metallischen Rohstoffen zu suchen. Stellen die Ozeane eine attraktive Alternative für die Rohstoffbeschaffung dar? ESKP (Earth System Knowledge Platform), die Wissensplattform des Forschungsbereichs „Erde und Umwelt“ der Helmholtz-Gemeinschaft, geht in dem Themenspezial vom Dezember 2018 dieser Frage nach.

Website: <https://themenspezial.eskp.de/rohstoffe-in-der-tiefsee>

Impressum

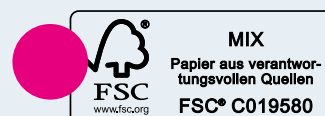
Herausgeber: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel

Redaktion: Sven Petersen, Matthias Haeckel, Jan Steffen

In Zusammenarbeit mit der Strategieguppe „Mineralische Ressourcen“
des Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM)“

Layout: Christoph Kersten

1. Auflage 2019

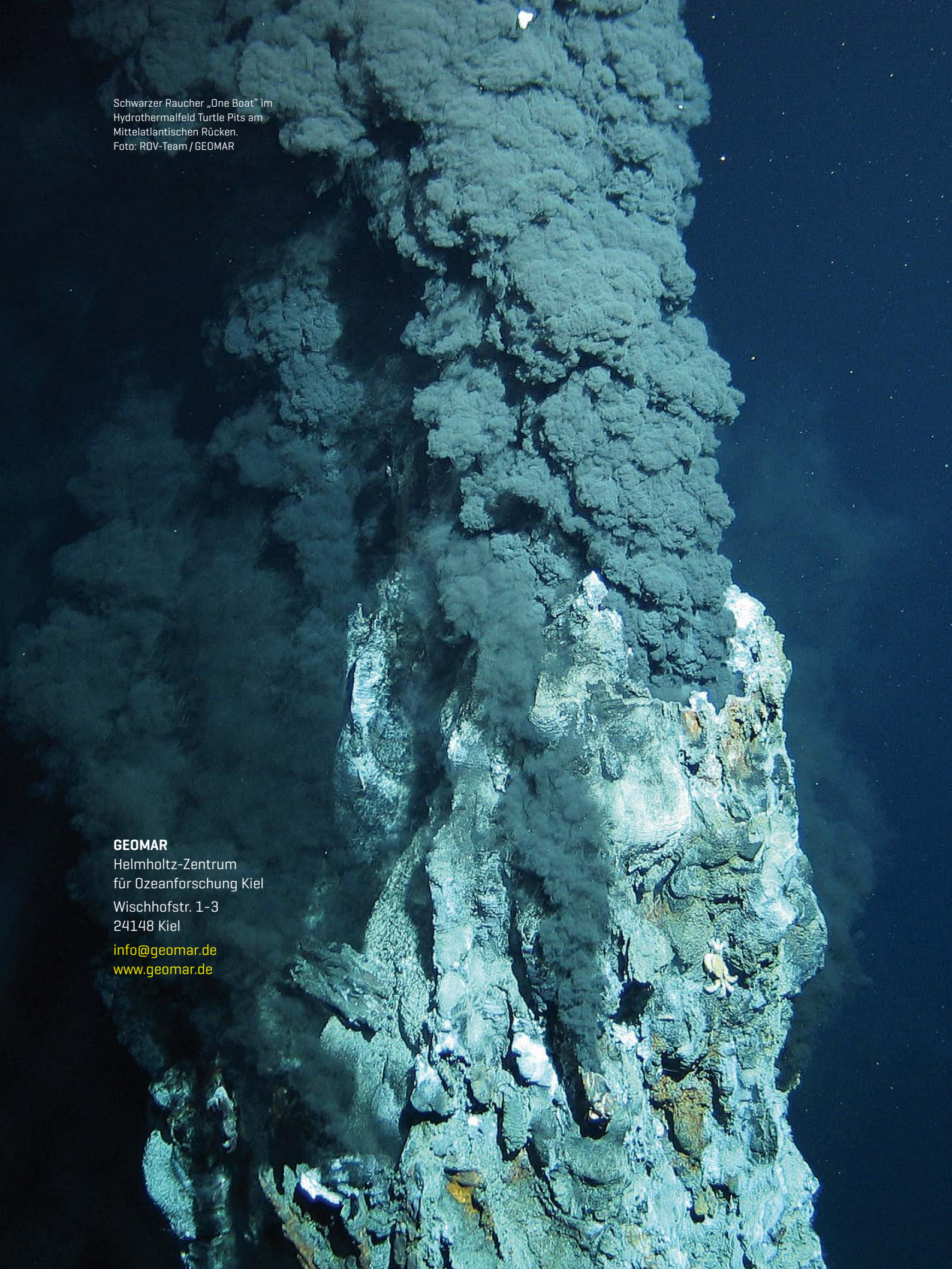


**Querschnitt durch eine
Manganknolle im Raster-
elektronenmikroskop**

Ein Gesteinsfragment
dient hier als Kern für die
Ablagerung von Mineralen.

Die feinen Ringe zeigen
die verschiedenen Wachs-
tumsperioden im Laufe
der Zeit. Visualisierung:
Sebastian Fuchs / GEOMAR





Schwarzer Raucher „One Boat“ im
Hydrothermalfeld Turtle Pits am
Mittelatlantischen Rücken.
Foto: ROV-Team / GEOMAR

GEOMAR
Helmholtz-Zentrum
für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1-3
24148 Kiel
info@geomar.de
www.geomar.de