

# GEOFOKUS



# Marine mineralische Rohstoffe: Anreicherungsprozesse und wirtschaftliches Potenzial

Hermann Kudrass<sup>1</sup>, Michael Wiedicke<sup>2</sup>, Carsten Rühlemann<sup>2</sup>, Thomas Kuhn<sup>2</sup>

## Einleitung

Meere bedecken die Erdoberfläche zu mehr als 70 % und trotzdem ist ihr Beitrag zur Versorgung der Erdbevölkerung mit festen mineralischen Rohstoffen verschwindend klein. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die prinzipiell andere Entstehung des Untergrundes der Ozeane. Während die Lagerstätten in den komplexen Gesteinen der Kontinente seit Milliarden von Jahren durch viele verschiedene magmatische, metamorphe und sedimentologische Prozesse entstanden sind, haben die Ozeanböden ein maximales Alter von 180 Millionen Jahren und sind durch wenige geologische Prozesse geprägt. Entsprechend sind die dort entstandenen Lagerstätten auf den vorwiegend basaltischen Ozeanböden relativ einförmig. Hinzu kommt, dass die marinen Lagerstätten in der Tiefsee durch ihre große Entfernung von Land schwer zugänglich sind und deshalb Explorations-, Gewinnungs- und Aufbereitungstechniken mit den hoch entwickelten Methoden für die Lagerstätten an Land nicht annähernd vergleichbar sind. Die zunehmende Gewinnung von Energierohstoffen aus dem Meer hat diesen technischen Rückstand bei der marinen Exploration deutlich verringert. Die Tiefseetechnologien für das Aufsuchen und die Ausbeutung der submarinen Erdöl- und Erdgaslagerstätten können nun mit einigen Anpassungen auch für die marinen mineralischen Rohstoffe genutzt werden und damit gewinnen sie schnell an geowissenschaftlichem und wirtschaftlichem Interesse. Auch die deutlich gestiegenen Preise für alle Rohstoffe deuten darauf hin, dass eine Versorgung aus den konventionellen Lagerstätten an Land bei rasch ansteigendem Mengenverbrauch zunehmend schwieriger wird. Deshalb werden alternative, eventuell

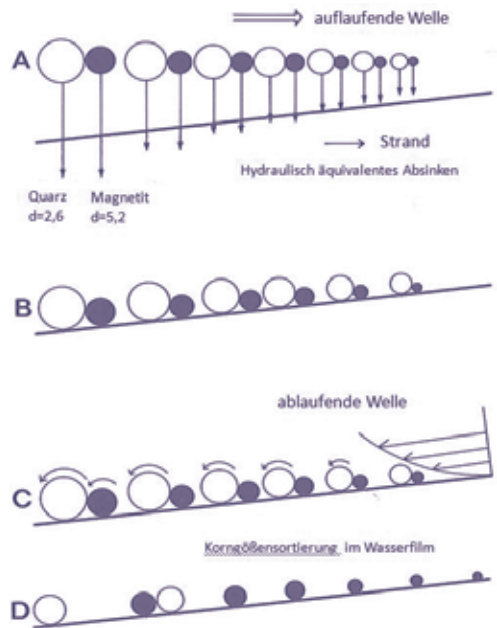
günstiger zu gewinnende Ressourcen in den Meeren gesucht.

In den folgenden Kapiteln werden die unterschiedlichen Rohstofftypen im Meer entsprechend ihrer dominanten Anreicherungsprozesse diskutiert und ihr wirtschaftliches Potenzial abgeschätzt.

## Sand und Kies

Sand und Kies bilden ausgedehnte Vorkommen auf fast allen Schelfen. Die meisten der terrigenen Sand- und Kiesablagerungen entstanden während der langen Glazialzeiten bei einem erheblich niedrigeren Meeresspiegelstand. Sie bildeten sich vor der Mündung von Flüssen, in hohen Breiten aus den Schmelzwasseraustritten der Gletscher und entlang der glazialen Küstensäume. Während aufeinander folgender Transgressionen und Regressionen wurden die oberflächennahen Sedimente mehrfach in den Brandungszonen des sich verschiebenden Küstensaums überprägt. Alle diese Sedimentvorkommen sind das Resultat einer strömungsbedingten Korngrößensortierung: die groben Sand- und Kiesanteile sind mehr ortsfest geblieben, während die leichter beweglichen Silt- und Tonpartikel in ruhigere Sedimentationsbereiche verfrachtet und damit abgetrennt wurden. Küstennahe Sandvorkommen (einschließlich des feineren Materials) werden in großen Mengen für die Landaufspülung und für den Küstenschutz verwendet. Grobkörnige Sedimente werden von der Baustoffindustrie genutzt. Der Abbau erfolgt mit verschiedenen Saug- und Kettenbaggern bis in 70 m Wassertiefe. Deutschland bezieht nur einen sehr geringen Teil des Betonkieses aus der zentralen Nordsee und spült zum Erosionsschutz der Insel Sylt jährlich 1 Mio. t Sand aus dem tiefen Vorstrandbereich auf. Weltweit werden große Mengen an

**Abb. 1: Anreicherung von Schwermineralen im Strandbereich.** Seibold und Berger (1982): *The seafloor: an introduction to marine geology.* - Springer Verlag, Berlin.



flachmarinen Schelfsedimenten für den Küstenschutz, die Landgewinnung z.B. bei der Anlage von Flughäfen und den Hafenausbau verwendet.

### Schwermineralagerstätten

Die Schwerminerale der Seifenlagerstätten stammen ebenfalls aus dem terrigenen Abtragungsschutt der Kontinente. Auf Grund ihrer höheren spezifischen Dichte ( $> 2,9 \text{ g cm}^{-3}$ ) werden die Schwerminerale in turbulenten Strömungen mit größeren Körnern von Leichtmineralen wie Quarz und Feldspäten zusammen transportiert (Abb. 1). Im laminaren Strom eines Wasserfilms im Strandbereich akkumulieren die Schwerminerale als Restsedimente, da die gleichzeitig abgesetzten Leichtminerale durch einen größeren Korndurchmesser leichter beweglich sind. Diese Selektion im Schwall und Sog der auf den Strand laufenden Wellen reichert vor allem die leichten Schwerminerale (spezifische Dichte  $3,5$  bis  $6 \text{ g cm}^{-3}$ ) in der Sandkorngröße an. Dies sind Rutil, Ilmenit, Magnetit, Zirkon, Monazit und Granat. Auflandige Winde

akkumulieren die mit Schwermineralen oberflächennah angereicherten Strandsande in Stranddünen, wo sie dem Transportsystem des Meeres entzogen sind und häufig sehr große Schwermineralvorräte enthalten.

Der hohe Titangehalt des Rutil und des Ilmenit wird für die Herstellung von Weißpigment und in geringerem Maß für den Leichtmetallbau genutzt. Die größte Produktion stammt aus den Strandseifen und -dünen in Australien und Südafrika. Vergleichbare Vorkommen als glaziale Strandseifen auf dem trockengefallenen Schelf zu lokalisieren, sind meist gescheitert. Nur auf einem breiten Schelf in Verbindung mit sehr hoher terrigener Sedimentzufuhr konnten die Schwermineralanreicherungen die massive Aufarbeitung durch die Brandung während der letzten Transgression überstehen. Ein gutes Beispiel sind die disseminierten Schwermineralanreicherungen vor dem heutigen Sambesidelta mit großen Mengen von Ilmenit (50 Mio. t), Rutil (1 Mio. t) und Zirkon (4 Mio. t) (Beiersdorf et al. 1980).

Magnetit wird vor allem als Zuschlagstoff bei der Eisenverhüttung gebraucht. Viele der Strandlagerstätten sind bekannt bzw. weitgehend ausgebeutet und nur in Südindien und Neuseeland sind möglicherweise neue Vorräte zu erkunden. Auf dem mittleren Schelf vor der Westküste der Nordinsel Neuseelands wird daher auf größere Magnetitvorkommen prospektiert.

Zirkon, Monazit und Granat sind häufige Bestandteile der Schwermineralanreicherungen. Zirkon wird als Gießereisand verwendet, Monazit enthält viele der seltenen Elemente (auch Seltene Erden) und könnte daher wieder an Wert gewinnen. Granat wird vielfach für die Herstellung von Schmirgelpapieren verwendet.

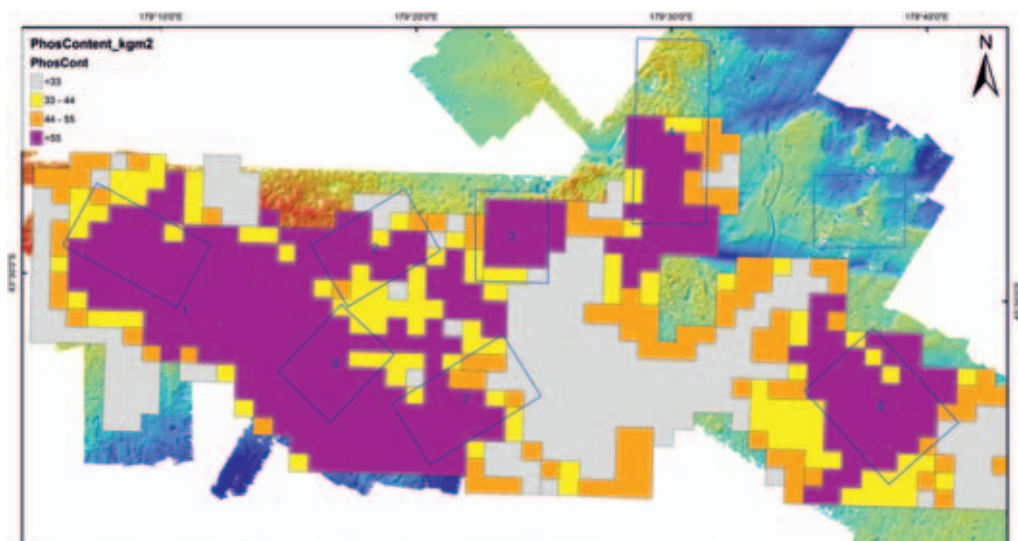
Die schweren Schwerminerale Zinnstein und Gold mit sehr hohen Korndichten sowie Diamanten mit größeren Korndurchmessern werden nur bei extremen Fluten an der Sohle eines Flussbetts transportiert und reichern sich nahe der Erosionsbasis in grobkörnigen Lagen an. Es ist daher keine Überraschung, dass die meisten marinen Abbaugebiete vor allem für Zinnstein in Thailand, Malaysia und Indonesien ertrunkene pleistozäne Flusstäler sind. Ähnliches gilt für Diamanten vor Südafrika und Namibia, die aber auch vom Küstenlängstransport sehr weit getragen werden können. Der marine Zinnsteinabbau ist infolge erschöpfter Lagerstätten, sinkender Preise und steigender Umweltansprüche nur noch in Indonesien von Bedeutung. Südafrika und Namibia fördern auf dem gesamten Schelf mit deutscher Abbautechnologie in großem Stil Diamanten aus sandigen Sedimenten, die an der Erosionsbasis und entlang der glazialen Küstenverläufe angereichert sind. Den langen Transportweg haben vor allem rissfreie Diamanten überstanden, die als Schmuckdiamanten erheblich höhere Preise erzielen. Gold wurde auf dem pazifischen Schelf vor Alaska aus glazialen Sedimenten geborgen, wobei die winterliche Eiskecke als Plattform für den Abbau genutzt wurde. Ein vollmariner Abbau ist dort gescheitert.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Schwermineralanreicherungen im Meer mit hoch effizienten Abbaugeräten gewonnen werden, auch

die Nutzung der enthaltenen Wertstoffe ist mit gut etablierten Verfahren sichergestellt. Aber die meisten Vorkommen sind erschöpft, neue große Vorkommen sind bei einem vergleichsweise guten Stand der Exploration der Schelfgebiete nicht zu erwarten. Im Fall eines exzessiven Abbaus können das ökologisch sensitive Küstenumfeld und der Schelf belastet oder auch die Stabilität der Küste verändert werden.

## Phosphorite

Phosphorite entstehen heute in größeren Mengen ausschließlich in der anoxischen Bodenwasser/Sedimentengrenzschicht unterhalb der biologischen Hochproduktionszonen der Auftriebsgebiete. Dort quillt nährstoffreiches und damit relativ phosphatreiches Bodenwasser auf, und im gedüngten Oberflächenwasser entwickelt sich rasch eine hohe biologische Produktivität. In der Folge sinken große Mengen von biologischen Abbauprodukten durch die Wassersäule auf den Boden. Auf dem Wege zum Boden wird der im Wasser gelöste Sauerstoff schnell verbraucht und die Zersetzung geht am Boden unter anoxischen Bedingungen weiter. Dabei wird in den  $C_{org}$ -reichen Ablagerungen Schwefelwasserstoff gebildet, der von Schwefelbakterien mit Nitrat aus dem Meerwasser als Energiequelle genutzt wird. Die ausgedehnten Kolonien von Schwefelbakterien bilden einen dichten Rasen auf dem Meeresboden und diese Bakterien speichern auch Polyphosphate. Bei einem Wechsel der Umweltbedingungen setzen die Bakterien die gespeicherten Phosphate frei, die dann mit im Porenwasser gelöstem Calcium oder mit Kalk als Karbonat-Fluor-Apatit ausgefällt werden (Schulz & Schulz 2005). Da der Phosphor in dem im Meerwasser praktisch unlöslichen Mineral gebunden ist, haben die Bakterien den für alle Lebewesen wichtigen Phosphor aus dem biologischen Kreislauf entzogen und dauerhaft im Meeresboden fixiert. Die sehr geringen Gehalte an Phosphor in der organischen Substanz bedingen einen sehr langsamen Transfer in die unlösliche Phosphoritphase. Dabei können am Meeresboden exponierte Karbonatgesteine phosphatisiert werden, meist



**Abb. 2: Gemittelte Phosphoritgehalte ( $\text{kg pro m}^2$ ) in Blöcken von  $1 \text{ km}^2$  auf dem Chatham-Rücken/Neuseeland, Wassertiefen von  $500 \text{ m}$  (blau) bis  $375 \text{ m}$  (rot), Spuren von Eisbergschrammen sind in der Bathymetrie gut erkennbar.**

bilden sich aber Phosphoritooide oder laminier- te Phosphorite mit Wachstumsraten von wenigen Millimetern in Millionen von Jahren. Eine wirtschaftlich interessante Phosphatlagerstätte kann auf Grund der langsamen Transferrate des Phosphors aus den biogenen Substanzen über die Schwefelbakterien in den Phosphorit nur unter langlebigen Auftriebszellen mit gelegentlicher Abtragung der organischen Schlämme und mechanischer Anreicherung des Phosphorits erfolgen. Diese Voraussetzungen sind streckenweise in den heutigen Auftriebsgebieten seit dem Miozän gegeben. Die Auftriebsgebiete liegen in der Regel an der Westseite der Ozeane, an der die Passatwinde für den notwendigen ablandigen Wassertransport sorgen. Das Muster der atmosphärischen Zirkulation reduziert den Niederschlag in den benachbarten Landgebieten, so dass die terrigene Sedimentzufuhr gering ist und die sich langsam bildenden Phosphorite nicht schnell überdeckt werden. Rasch wechselnde Strömungsmuster, wie sie bei den El Niño/La Niña Perioden vor Südamerika beobachtet werden, sorgen für eine Umlagerung der

$\text{C}_{\text{org}}$ -reichen Sedimente, während der Phosphorit über lange Zeit ortsfest akkumuliert.

Das Miozän war aus bisher nicht ganz bekannten Gründen eine Periode, in der besonders viele Phosphatanreicherungen unter den heutigen Auftriebsgebieten, aber auch in anderen, heute nicht im Auftrieb liegenden Schelfen entstanden sind. Die Schelfvorkommen vor Chile, Peru, dem Golf von Kalifornien, Togo, Namibia, Südafrika und Neuseeland sind in dieser Periode gebildet worden. Ein Teil dieser Gebiete wird in jüngster Zeit exploriert und an den Vorbereitungen für einen marinen Bergbau auf Phosphorit wird vor Namibia und Neuseeland intensiv gearbeitet. Die stark angestiegenen Preise für Phosphorit lassen einen Abbau auch unter den schwierigen Bedingungen eines offenen Schelfs in Wassertiefen von über  $150 \text{ m}$  wirtschaftlich erscheinen. Hinzu kommt der gestiegene Preis für Erdöl, der den Massentransport über große Entfernungen erheblich verteuert hat. Dies gilt besonders für die Landwirtschaft in Südostasien oder Australien, die früher durch die inzwischen erschöpften Guanophosphorite auf den ozeanischen



*Abb. 3: Meeresbodenprobe (50 x 50 cm) mit unterschiedlich großen Manganknollen*

Inseln Nauru und Christmas Island versorgt wurden. Nach ersten Abschätzungen können die miozänen Phosphorite auf dem Chatham-Rücken vor Neuseeland zu vergleichbaren Kosten gewonnen werden, die der Transport von der Phosphoritlagerstätte in Marokko bis Neuseeland verursacht. Der Abbau dieses Phosphorits, der an der Oberfläche des Chatham-Rückens in rund 400 m Wassertiefe in Glaukonit führenden Sanden als Grobsand bis Feinkies vorkommt (Abb. 2), soll mit einem geschleppten Saugkopf erfolgen. Die technischen Vorbereitungen sind angelaufen und ein Abbau könnte 2014 beginnen. Auch für die Vorkommen auf dem äußeren Schelf vor Namibia haben die bergbautechnischen Arbeiten begonnen.

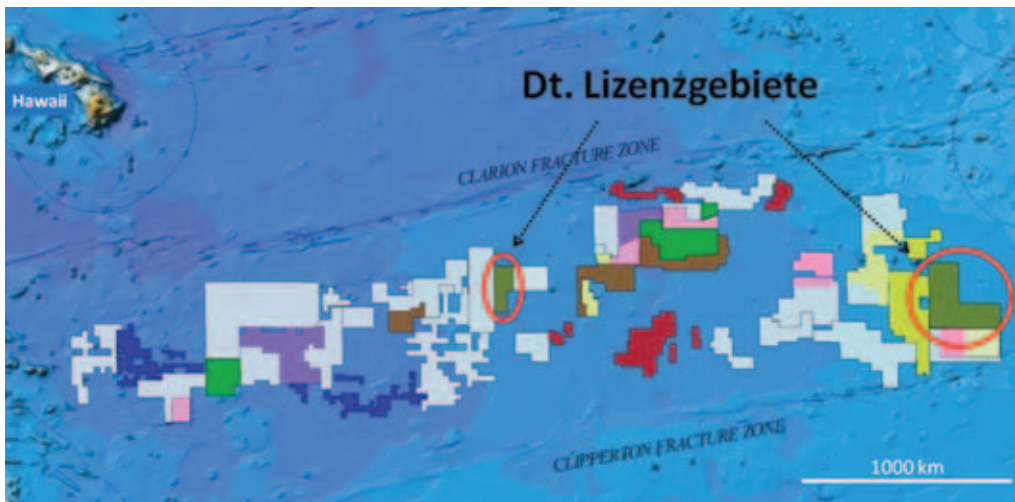
Die marinen Phosphorite gewinnen mit steigenden Preisen des Rohstoffes in den herkömmlichen Fördergebieten von Marokko und USA zunehmend an Interesse. Besonders eine Versorgung von lokalen Märkten aus nah gelegenen marinen Vorkommen kann bei den gestiegenen Transportkosten den Wert dieser Vorkommen relativ steigern und einen marinen Bergbau für die Versorgung des lokalen Markts ermöglichen. Die Voraussetzungen für eine Gewinnung nach dem Prinzip der Diamantenförderung vor Namibia/Südafrika oder mit

einem Saugbagger scheinen technisch beherrschbar zu sein.

### **Manganknollen (polymetallische Knollen)**

Manganknollen bilden sich an der Wasser-Sedimentschicht in vielen Gebieten der Ozeane. Sie bestehen im Wesentlichen aus den beiden redox-sensitiven Metallen Mangan und Eisen, die unter reduzierenden Bedingungen im Sediment im Porenwasser löslich sind und im oxischen Milieu des Bodenwassers ausgefällt und dabei in Knollen am Meeresboden fixiert werden (Abb. 3). Mikroorganismen haben vermutlich eine katalysierende Wirkung bei der Fällung auf den Knollenoberflächen. Die ausschließlich bei der Diagenese der jüngsten Sedimente entstandenen Manganknollen sind wirtschaftlich nicht interessant. Die Manganknollen in den weit von Land entfernten Gebieten des Pazifiks und des Indischen Ozeans haben neben einer diagenetischen Zufuhr aus dem unterlagernden Sediment noch eine sogenannte hydrogenetische Zufuhr. Dabei werden im Bodenwasser gelöste oder adsorptiv gebundene Metalle wie Mangan, Eisen, Nickel, Kupfer, Kobalt u.a. auf den Manganknollen abgeschieden. Die Metalle in den weit von Land entfernten Vorkommen stammen aus verschiedenen Quellen wie





**Abb. 4:** Lizenzgebiete für Manganknollen der Internationalen Meeresbodenbehörde im Zentralpazifik (Stand 2011).

dem hydrothermalen Eintrag entlang der Spreizungsrücken, von der submarinen Verwitterung des ozeanischen Basalts und vom Staubeintrag; selbst ein kleiner Eintrag durch nickelreiche Meteorite wird angenommen. Der Hauptanteil der Spurenelemente stammt offenbar aus der Zersetzung des biologischen Detritus, das aus dem produktiven Oberflächenwasser absinkt. Die höchsten Konzentrationen der wirtschaftlich interessanten Metalle in den Knollen befinden sich in den Vorkommen nahe den hochproduktiven Auftriebsgebieten der Ozeane. Bei sehr langsamen Wachstumsraten von 2 bis 10 mm pro Million Jahre würden die Knollen von der wenn auch geringen Sedimentation des terrigenen Materials bedeckt und begraben werden. Dies ist allerdings recht selten, so dass die Knollen wahrscheinlich durch relativ häufiges Umwälzen durch das Benthos an der Oberfläche des Meeresbodens gehalten werden. Die Manganknollen mit den höchsten Konzentrationen an wirtschaftlich interessanten Metallen haben sich im pazifischen Manganknollengürtel zwischen der Clarion- und der Clipperton-Bruchzone gebildet (Abb. 4). Diese Zone enthält etwa 25 bis 40 Milliarden Tonnen Manganknol-

len. Die Summe der Gehalte an Kupfer, Nickel und Kobalt, die den eigentlichen Wert der Manganknollen für die Stahl- und Elektroindustrie darstellen, beträgt 2,5 bis 3 Gewichtsprozent. Daneben sind aber auch weitere interessante Metalle angereichert wie Zink, Titan, Molybdän (Tab. 1). Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hat 2006 eine Explorationslizenz von der Internationalen Meeresbodenbehörde erworben, eine UN-ähnliche Institution, die das „gemeinsame Erbe der Menschheit“ in den Gebieten außerhalb der nationalen Jurisdiktion verwaltet. In diesem 75.000 km<sup>2</sup> großen Gebiet mit Wassertiefen von 4.000 bis 5.000 m (siehe Titelblatt) sind knapp 1 Mrd. t Manganknollen mit einer mittleren Belegungsdichte von 15 kg pro m<sup>2</sup> Meeresboden enthalten. Die BGR hat die detaillierte bathymetrische Vermessung des Gebietes abgeschlossen und eine erste flächenmäßige Abschätzung der Belegungsdichten auf der Basis von hydroakustischen Vermessungen durchgeführt.

Die Gewinnung der Manganknollen aus Wassertiefen von über 4.000 m ist eine große technische Herausforderung. 1978 war es einem deutschen Konsortium in Zusammenarbeit mit

**Tab. 1:** Geochemische Zusammensetzung von Manganknollen und -krusten (nach Wiedicke et al. 2012)

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

internationalen Partnern gelungen, mit einem geschleppten Kollektor 700 t Manganknollen zu bergen. Inzwischen hat sich die Tiefsee-Technologie durch die Erschließung von Erdöl- und Erdgasvorkommen an den tiefen Kontinentalhängen erheblich erweitert und verbessert, so dass verschiedene Lizenznehmer wie Russland, China und Indien realistische Konzepte für ein Abbaugerät vorgestellt haben. Auch die BGR hat einen solchen Manganknollen-Kollektor von einer deutschen Firma entwerfen lassen (Abb. 5). Schwierig ist allerdings auch die Extraktion der Wertmetalle. Bis heute ist nur im Labormaßstab eine Gewinnung der vier wichtigsten Metalle (Kupfer, Nickel, Kobalt, Mangan) konzipiert, aber eine kosten- und energie günstige, industrielle Nutzung bei der eventuellen Gewinnung von diesen und anderen Wertstoffen ist bisher nicht erprobt. Erst wenn die gesamte Wertschöpfungskette mit realistischen Kostenplänen und einem ökologisch unbedenklichen Abbauverfahren etabliert ist, bestehen Chancen, das beträchtliche Investitionsvolumen zu bewältigen. Das Interesse für diese enorm großen Metallvorkommen in der Tiefsee des Pazifischen und Indischen Ozeans wird auch in Zukunft steigen und die neue Beantragung von drei weiteren

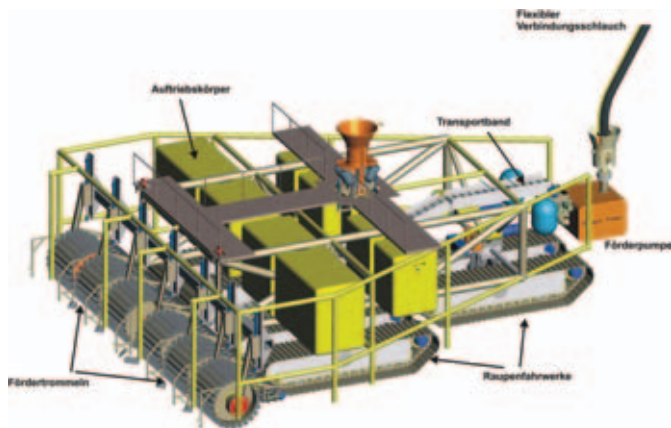
Lizenzen bei der Internationalen Meeresbodenbehörde bestätigt diesen Trend.

### Mangankrusten (polymetallische Krusten)

Die Mangankrusten haben ebenso wie die Manganknollen extrem langsame Wachstumsraten von wenigen Millimetern pro Million Jahre. Sie entstehen auf fast allen Festgesteinen, die über lange Zeiten dem Meerwasser ausgesetzt sind (Abb. 6). Die wirtschaftlich interessanten Mangankrusten sind durch hohe Kobalt-, Nickel- und Titan-gehalte gekennzeichnet, Platin und einige der seltenen Erden sind ebenso stark angereichert (Tab. 1). Die Krusten sind vor allem im nord-äquatorialen Pazifik an den exponierten Flanken der in diesem Gebiet sehr häufigen submarinen Vulkankegel weit verbreitet. Der dezimeterdicke Panzer der Mangankrusten spiegelt die paläoozeanographischen und spurengeochemischen Veränderungen des Bodenwassers in ihrem lagenweisen Aufbau wider. Die höchsten Konzentrationen an Wertmetallen sind in Wassertiefen zwischen 800 und 2.500 m zu finden und diese Zone entspricht heute einem Wasserkörper mit leicht reduzierten Sauerstoffgehalten, in den Spuren der Metalle als Hydroxide leichter transportiert werden.



**Abb. 5: Kollektor für Manganknollen (Dimension 16 m x 16 m), Entwurf AkerWirth/Erkelenz**



**Abb. 6: Mangankruste auf Karbonatgestein**



Die Menge der Mangankrusten ist mit etwa 40 Milliarden Tonnen so groß wie die der Manganknollen im Knollengürtel. Es gibt zwar mehrere Überlegungen, wie die Mangankrusten von dem harten, meist geneigten Untergrund der vulkanischen Kuppen abgelöst und gefördert werden könnten, aber ein realisierbares Bodenfahrzeug, das in dem rauen Relief effizient den Abbau betreiben könnte, ist bislang nicht konzipiert worden. Für die Aufbereitung der Krusten gilt ein ähnliches Defizit wie für die Manganknollen, da eine industrielle Aufbereitung bisher nicht erprobt ist. Erschwerend für eine wirtschaftliche Gewinnung der Krusten sind die geringen Gehalte an Kupfer und Nickel, während die hohen Kobalt- und Tellurgehalte bei einem potenziellen Abbau einen merklichen Anteil des Weltmarktes beanspruchen würden. Dies könnte einerseits zum Verfall der Kobaltpreise, andererseits auch

zu Einsprüchen von den Kobaltproduzenten an Land führen, falls der Abbau im Gebiet der Meeresbodenbehörde liegt. Insgesamt gesehen, ist daher aus heutiger Sicht eher mit einem Abbau der Manganknollen zu rechnen.

### Hydrothermale Lagerstätten (polymetallische Sulfide)

Die enormen Temperaturunterschiede oberhalb der Magmenkammern der mittelozeanischen Rücken und der submarinen Vulkane generieren vertikale Fluid-Zirkulationszellen in den oberen Kilometern des Meeresbodens (Abb. 7). Nach überschlägigen Berechnungen wird das gesamte Wasservolumen der Ozeane in einer Million Jahre einmal durch das hydrothermale System der mittelozeanischen Spreizungsrücken zirkuliert. Die Tiefe der Zirkulationszellen von 1,5 bis 2,5 km hängt von der Position der Magma-

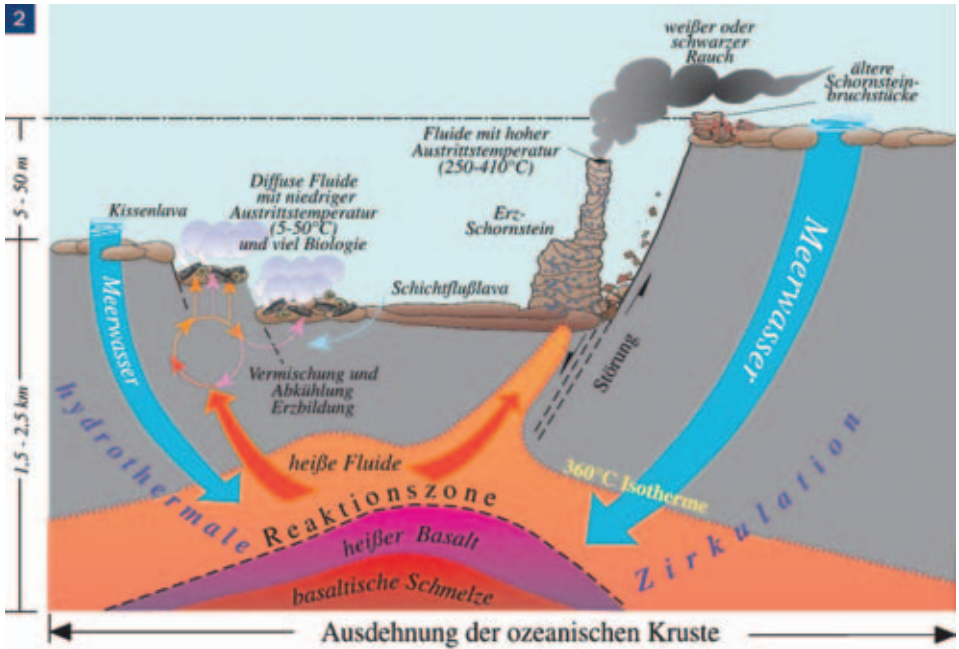


Abb. 7: Schema für hydrothermale Zirkulation an ozeanischen Spreizungszentren

kammer und der tektonisch geschaffenen Wegsamkeit ab. Kaltes Bodenwasser wird beim Durchströmen durch die zerklüfteten, meist basaltischen oder andesitischen Gesteine schnell bis über den kritischen Punkt von 450 °C erhitzt. Dabei wird aus dem kalten, sauerstoffreichen Bodenwasser mit einem pH-Wert von 7 durch Reaktion mit den ozeanischen Gesteinen ein überkritisches, saures, höchst aggressives Fluid, das zuerst die Metallsulfide, aber auch die Gläser und Silikatminerale wie Olivin, Augit, Hornblende und Feldspäte zersetzt. Die Fluide steigen auf Grund ihrer geringeren Dichte meist direkt über der Wärmequelle in dort meist reichlich ausgebildeten, besonders wegsamen Verwerfungen auf und vermischen sich mit dem kalten, seitlich zugeführten Meerwasser. Während des Aufstiegs werden die in der Tiefe mobilisierten Elemente mit zunehmender Abkühlung entsprechend ihren Stabilitätsbedingungen in „Stockwerken“ ausgefällt. Einige aufsteigende Fluide erreichen mit Temperaturen bis 450 °C

den Meeresboden, wo die gelösten Metalle als Sulfide ausgefällt werden und dabei bis zu 30 m hoch aufragende Erzschlote bilden. Ein Großteil der Lösungsfracht wird über meist schwarze Suspensionsfahnen (schwarze Raucher) im Bodenwasser verteilt. Niedriger temperierte Austritte enthalten vorwiegend helle Silikat- und Sulfatpräzipitate (weiße Raucher). Chemosynthetische Organismen nutzen diese vom Sonnenlicht unabhängige Energiequelle und eine hoch diverse, lateral sehr variable Ökogemeinschaft lebt auf und in der Nähe dieser hydrothermalen Quellen. In den Schloten und in den bodennahen Fällungszonen sind vor allem Eisen, Kupfer, Zink, Blei, Gold und Silber meist als Sulfide angereichert. Neben den vielen Metallsulfiden sind Anhydrit und Quarz die häufigsten Minerale der Vererzung. Einzelne Vorkommen in den Backarc-Spreizungszonen der pazifischen Randmeere sind wirtschaftlich besonders interessant. Vor Papua-Neuguinea etwa exploriert seit einigen Jahren eine kanadische Firma

(Nautilus Minerals Inc.) das lokale Spreizungszentrum und hat im Solwara-Feld der Bismarck-See abbauwürdige Sulfid-Vererzungen von 2,2 Mio. t mit Kupfer, Zink und Gold in rund 1.600 m Wassertiefe mit geoelektrischen Messungen und über 100 Bohrungen nachgewiesen. Ähnliche Vererzungen wurden an weiteren Positionen entlang des lokalen Spreizungsbogens nachgewiesen. Die Abbautechnik soll in Großbritannien, die Fördertechnik in Frankreich und das Bergbauschiff in Deutschland gebaut werden. Die Bergbaulizenz ist erteilt, so dass dieser Tiefseebergbau in den nächsten Jahren starten könnte. Die Aufbereitung der Erze wird mit den üblichen Verfahren für sulfidische Erze an Land erfolgen.

Das größte bisher bekannte Hydrothermalvorkommen ist entlang des Spreizungsrückens im juvenilen Ozean des Roten Meeres im Grenzgebiet zwischen dem Sudan und Saudi-Arabien entstanden. Der absteigende Zweig der hydrothermalen Zirkulationszelle löst dort miozäne Salze aus den Sedimenten des Kontinentalhangs und erzeugt damit im aufsteigenden Zweig die am Meeresboden austretende Salzlauge, die dichter und schwerer ist als das Meerwasser. Die salzreiche 60 °C warme anoxische Sole und alle darin gelösten Metalle bleiben daher am Grunde von einzelnen Becken gefangen. In dem größten 2.000 m tiefen Atlantis-Becken konnten 94 Millionen Tonnen an hydrothermalen Schlämmen nachgewiesen werden, die sich in Form von Eisen- und Manganhydroxiden und von Eisen-, Kupfer- und Zinksulfiden angesammelt haben. Preussag hat dort in den späten 70er Jahren Förder- und Aufbereitungsversuche auf Kupfer, Zink und Silber erfolgreich durchgeführt, eine wirtschaftliche Förderung war aber damals nicht möglich.

## Ausblick

In den letzten Jahren ist das Interesse an den marinen mineralischen Rohstoffen weltweit erheblich gestiegen. Dies hat bisher zwar noch nicht zu einer Gewinnung von mineralischen Rohstoffen aus der Tiefsee geführt, aber es gibt eine Reihe von Argumenten, die lang- oder

mittelfristig die Realisierung eines Tiefseebergbaus wahrscheinlich werden lassen: (a) Die marinen Rohstoffvorkommen erweitern die bisher bekannte globale Rohstoffbasis. Ihr Beitrag wird durch die anhaltende Erforschung immer präziser gefasst werden können. (b) Die tiefmarinen Vorkommen erscheinen sowohl hinsichtlich der Metallanreicherungen als auch des Erschließungsaufwandes vielen Landlagerstätten vergleichbar und in Einzelfällen auch überlegen. (c) Ein wesentlicher Teil der Vorkommen untersteht der Verwaltung durch die Internationale Meeresbodenbehörde. Damit sind sie in ein stabileres Rechtssystem eingebunden und unterliegen nicht wie einige der Landlagerstätten den manchmal schwer vorhersehbaren Änderungen einer nationalen Rohstoffpolitik. Sie können daher einen Beitrag zur Diversifizierung der Bezugsquellen und zur langfristigen Versorgungssicherheit eines Landes leisten. (d) Für die Förderung aus der Tiefsee müssen umweltschonende, innovative, technologische Lösungen entwickelt werden. Entwicklung und Bau geeigneter Förder- und Aufbereitungstechnologien eröffnen neue wirtschaftliche Chancen für ein exportorientiertes Hochtechnologieiland.

Einen Tiefseebergbau gibt es bisher noch nicht, und es sieht heute so aus, als ob der erste Abbau auf Sulfide im Westpazifik oder auf Phosphorite vor Neuseeland begonnen wird. Dabei sei betont, dass die Rolle des sich entwickelnden Tiefseebergbaus in der Ergänzung und Erweiterung des klassischen Rohstoffbergbaus an Land gesehen wird – nicht in seiner Verdrängung. Tempo und Umfang dieses sich gerade entwickelnden Tätigkeitsfeldes sind schwer anzugeben. Von herausragender Bedeutung wird sein, dass die Gewinnung ökologisch verträglich geplant und durchgeführt wird. Nur dann wird sie den Anforderungen der Seerechtskonvention genügen. Diese Herausforderung kann konstruktiv angegangen werden – denn anders als an Land werden für die Gewinnung von marinen mineralischen Rohstoffen die Regeln für einen zukünftigen Abbau fachkundig definiert, **bevor** ein Abbau begonnen hat.

## Literatur

Beiersdorf, H., Kudrass, H. R. und von Stackelberg, U. (1980): *Placer deposits of ilmenite and zircon on the Zambesi shelf*. - *Geol. Jahrbuch*, **D 36**, 5–85.

Von Rad, U. und Kudrass, H. R. (1984): *Phosphorite deposits on the Chatham Rise, New Zealand*. - *Geol. Jahrbuch*, **D 65**, 5–262.

Schulz, H. N. & Schulz, R. (2005): *Large Sulfur bacteria and the formation of phosphorite*. - *Science*, **307**, 416–418

Wiedicke, M., Kuhn, T., Rühlemann, C., Schwarz-Schampera, U. & Vink, A. (2012): *Marine mineralische Rohstoffe der Tiefsee – Chance und Herausforderung*. - *Commodity Top News*, **40**, 1–10. BGR-Homepage: [bgr.bund.de](http://bgr.bund.de)

## Autoren

<sup>1</sup> Marum Zentrum für marine Umweltwissenschaften, Bremen

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover