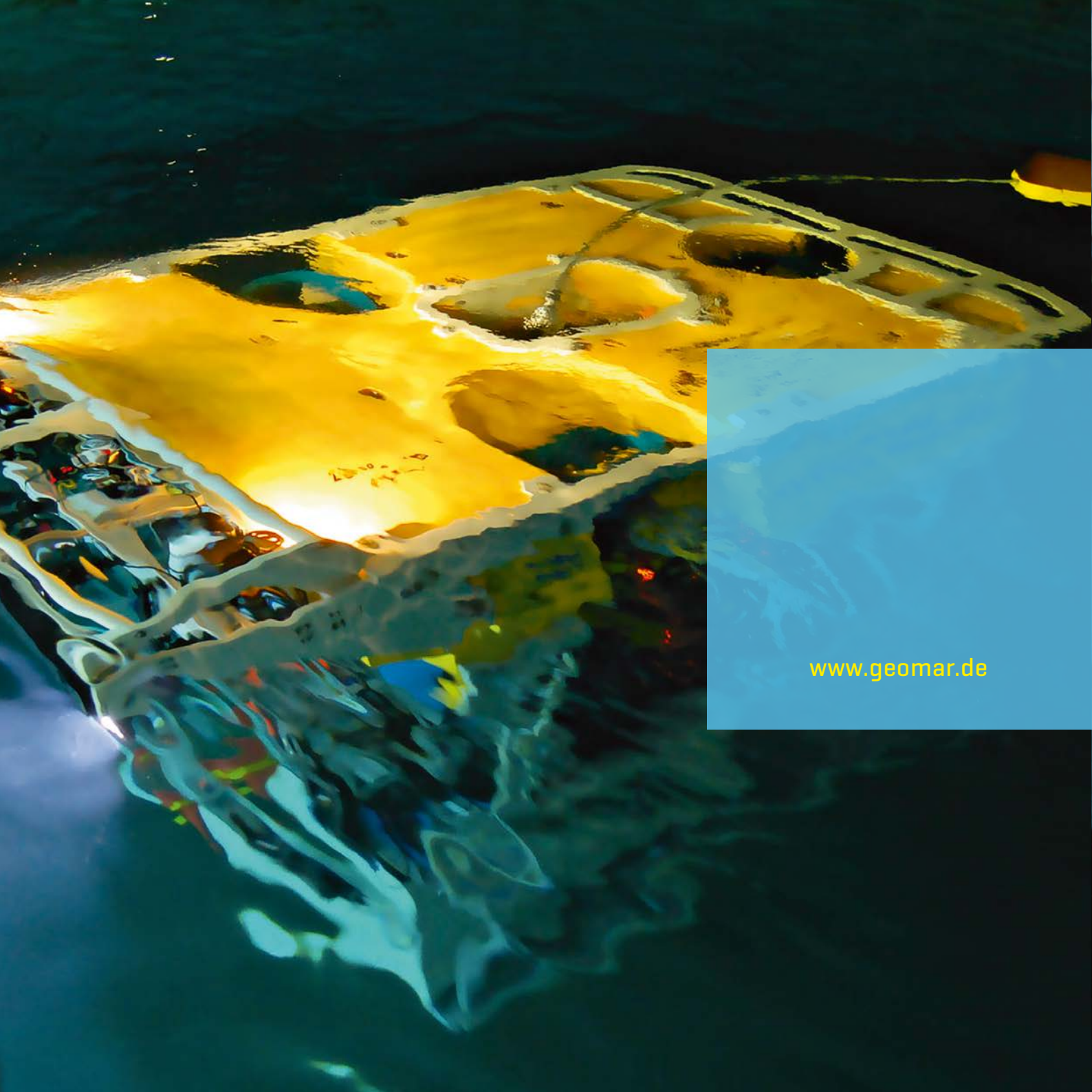




Massivsulfide – Rohstoffe aus der Tiefsee

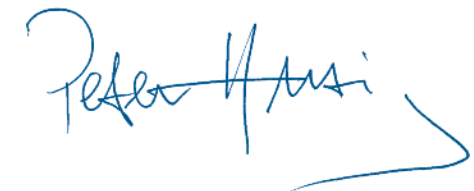
www.geomar.de

Sehr geehrte Damen und Herren,

ob Kupfer, Zink, Gold oder die in letzter Zeit oft zitierten Seltenen Erden, der Bedarf an metallischen und mineralischen Rohstoffen ist ungebrochen. Die Erschließung neuer Lagerstätten wird zunehmend schwieriger, was, in Kombination mit der hohen Nachfrage, zu steigenden Preisen führt. Derzeit werden überwiegend Ressourcen an Land genutzt, zunehmend richtet sich das Interesse aber auch auf submarine Vorkommen. Die Meeresforschung hat hier in den letzten Jahrzehnten mit ihren Entdeckungen den Weg für eine zukünftige Nutzung geebnet. Als 1979 die ersten heißen Tiefseequellen, die „Schwarzen Raucher“, entdeckt wurden, dachte noch niemand an Rohstoffe. Erst als in den sulfidischen Ablagerungen zum Teil sehr hohe Konzentrationen verschiedener Elemente nachgewiesen wurden, erwachte das Interesse. Nun gibt es erste konkrete Pläne für die Nutzung

solcher Lagerstätten im Meer. Neben den wirtschaftlichen Aspekten spielt aber auch der Schutz der marinen Umwelt eine wichtige Rolle. Am GEOMAR | Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel wird bereits seit vielen Jahren Forschung zu marinen Rohstoffvorkommen betrieben. Mit einem interdisziplinären Forschungsansatz und in enger Kooperation mit Wissenschaftlern weltweit werden die verschiedenen Aspekte, die für die Nutzung submariner mineralischer Rohstoffe relevant sind, umfassend betrachtet. Mit dieser Broschüre möchten wir auf einem allgemeinverständlichen Niveau den aktuellen Kenntnisstand zu diesem Thema zusammenfassen.

Viel Spaß bei einer hoffentlich informativen Lektüre wünscht Ihnen



Prof. Dr. Peter M. Herzig
Direktor



4 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% den größten Teil der Erdoberfläche ausmachen, werden bisher kaum genutzt. Obwohl mineralische Rohstoffe wie Sand und Kies, aber auch Diamanten, schon seit Jahrzehnten aus den Flachwasserbereichen der Ozeane gewonnen werden, bestand an den Metallvorkommen der Tiefsee in den letzten Jahren weniger Interesse. Doch die anhaltend hohe Nachfrage und die daher stark gestiegenen Rohstoffpreise rücken den Meeresbergbau in der Tiefsee jetzt in den Bereich der Wirtschaftlichkeit.

Muschelfeld im südlichen Atlantik.
Titel: Schwarzer Raucher im Atlantik.

SCHWARZE RAUCHER sind Austrittsstellen von bis über 400 °C heißer Fluide, in denen verschiedene Metalle gelöst sind. Im Beispiel rechts ist der Schlot eines Schwarzen Rauchers gut zu erkennen. Der gelbliche Saum besteht aus goldreichen Kupfersulfiden, der Randbereich aus Zinksulfiden und anderen Mineralen.



Der Meeresboden – eine Rohstoffquelle für die Menschheit?

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. Künftig aber dürften eine Reihe von mineralischen Rohstoffen hinzukommen. So gibt es seit kurzem Bestrebungen, den Meeresbergbau auf mineralische Rohstoffe auf die Tiefsee auszuweiten.

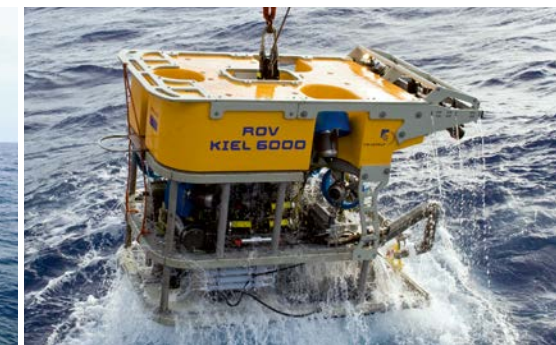
Zu den Rohstoffen, die aus der Tiefsee gefördert werden sollen, zählen neben den Manganknollen (meist in Wassertiefen von etwa 5.000 Meter), die Kobaltkrusten entlang der Flanken submariner Gebirgszüge (meist zwischen 1.000 und 2.500 Meter Tiefe) sowie die Massivsulfide und die Sulfidschlämme, die sich in Bereichen vulkanischer Aktivität an den Plattengrenzen in den Ozeanen in Wassertiefen zwischen 500 und 5.000 Meter bilden. Alle drei Rohstofftypen werden oftmals als nachwachsende Rohstoffe bezeichnet. Dies ist aber irreführend, da die Metalle z. B. in Manganknollen und Kobaltkrusten über einen Zeitraum von Jahrmillionen

5

Links: Das autonome Unterwasserfahrzeug AUV ABYSS dient meist der bathymetrischen Kartierung größerer Bereiche des Meeresbodens in höchster Auflösung (Dezimeterbereich). Zusätzlich ist das AUV mit einer Reihe chemischer und physikalischer Sensoren ausgestattet, die Untersuchungen in der Wassersäule bis in eine Wassertiefe von 6.000 m erlauben.



Rechts: Der ferngesteuerte Tiefseeroboter ROV KIEL 6000 wird zur punktgenauen Beprobung des Meeresbodens sowie dem Ausbringen und Einholen wissenschaftlicher Experimente am Meeresboden eingesetzt. Wie das AUV kann auch der ROV in Wassertiefen bis zu 6.000 m operieren.



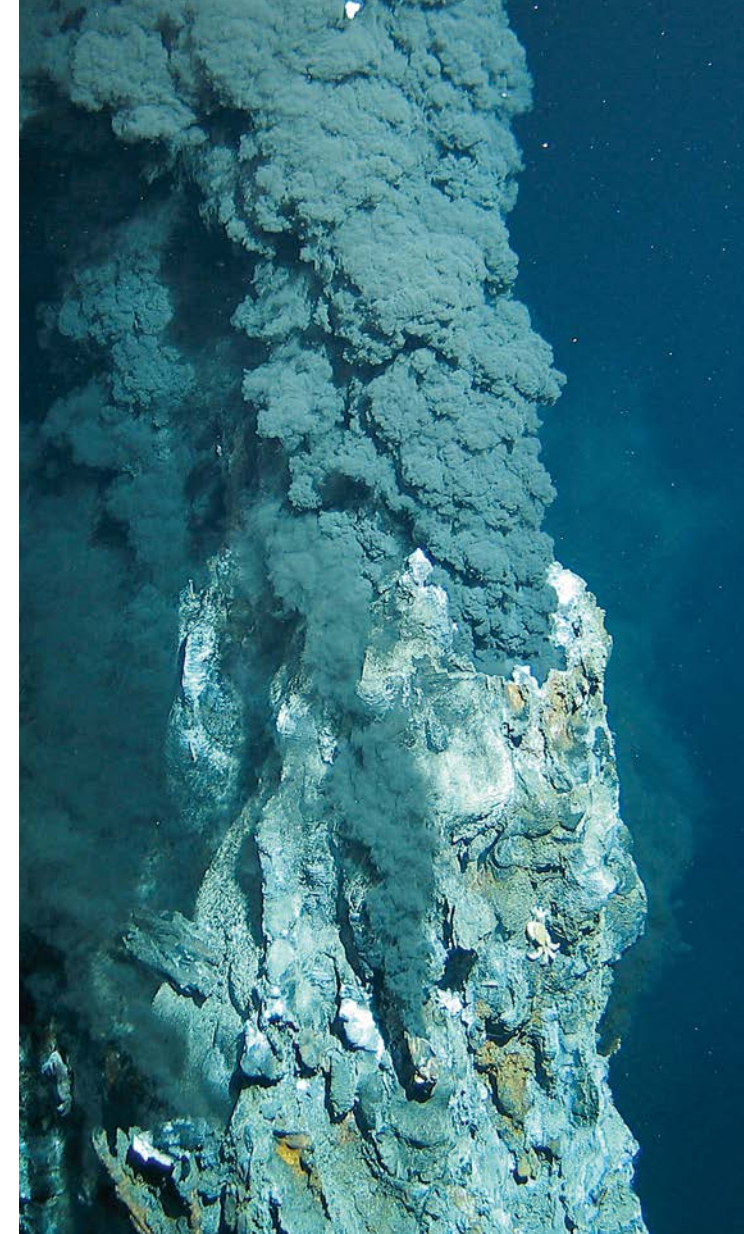


Veränderung verschiedener Metallpreise von 2006 – 2015. Quelle: InfoMine.com

6 angereichert werden. Selbst die deutlich schneller wachsenden Massivsulfide benötigen Jahrtausende, um wirtschaftlich interessante Tonnagen zu erreichen. Bereits in den 1980er Jahren gab es, nicht zuletzt aufgrund der Vorhersagen des „Club of Rome“ zur Rohstoffverknappung, ein großes Interesse an den Rohstoffen der Tiefsee. Ganze Forschungsflotten untersuchten die Manganknollenfelder im Pazifischen Ozean auf ihre Eignung als mögliche Rohstoffquelle für Nickel, Kupfer und Kobalt. Doch die Vorhersagen traten nicht ein und das rohstoffpolitische Interesse der Industrieländer schwand. Zum einen sanken die Rohstoffpreise, zum anderen fand man neue Landlagerstätten. Diese erste Meeresbergbau-Euphorie und die Furcht vor einer Ausbeutung der Meere durch die Industrieländer auf Kosten der Allgemeinheit führte zur Gründung der Internationalen Meeresbodenbehörde der Vereinten Nationen in Jamaika (International Seabed Authority,

ISA) sowie zur Unterzeichnung der „Verfassung der Meere“ UNCLOS (United Nations Convention on the Law of the Sea) im Jahr 1982. Dieses Abkommen bildet seit seinem Inkrafttreten 1994 für alle Unterzeichner die Grundlage für die Nutzung mariner Rohstoffe am Meeresboden außerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen der Nationalstaaten. Das derzeit wieder erstarkte Interesse ist auf die in den letzten Jahren stark gestiegenen Rohstoffpreise und insbesondere das starke Wirtschaftswachstum in Ländern wie China und Indien zurückzuführen.

Auch Wirtschaftskrisen werden diesen Trend vermutlich nicht lange aufhalten. Zusätzlich spielen aber auch politische Überlegungen der Industrie- und Schwellenländer zur Rohstoffsicherung eine große Rolle.



Schwarzer Raucher im Atlantik.

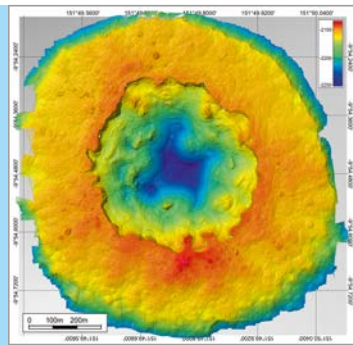
DIE SCHWARZEN RAUCHER HABEN IHREN NAMEN aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit Industrieschornsteinen. Während des Aufstiegs durch den Meeresboden sind die Metalle in dem heißen Fluid gelöst und die Flüssigkeit ist damit farblos. Erst durch den Kontakt der heißen Lösung mit dem kalten, sauerstoffreichen Meerwasser werden die Metalle ausgefällt und färben die austretende Lösung schwarz.

Massivsulfide

Hierbei handelt es sich um sulfidische (schwefelhaltige) Metallerze, die an sogenannten „Schwarzen Rauchern“ entstehen. Solche Erzvorkommen bilden sich an submarinen Plattengrenzen, an denen durch das Zusammenwirken von vulkanischer Aktivität und Meerwasser ein Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Gesteinen des Meeresbodens und dem Ozean stattfindet. Kaltes Meerwasser wird dabei entlang von tiefreichenden Spalten und Rissen bis zu mehreren Kilometern in den Meeresboden gepresst. In der Nähe einer Wärmequelle, wie zum Beispiel einer Magmenkammer, wird das Meerwasser auf Temperaturen von mehr als 400 Grad Celsius erhitzt. Es reagiert dabei chemisch mit dem umgebenden Gestein, wird aggressiv und löst Metalle aus dem durchströmten Gestein heraus. Aufgrund der Erwärmung verringert sich die spezifische Dichte und das veränderte Meerwasser steigt sehr schnell zum Meeresboden auf und tritt unter hohem Druck aus kaminähnlichen Schloten, den Schwarzen Rauchern, am Meeresboden aus. Dort, wo die heiße, chemisch veränderte und metall- sowie schwefelreiche Lösung mit dem kalten Meerwasser in Berührung kommt,



SCHWARZE RAUCHER BILDEN SICH in Bereichen vulkanischer Aktivität. Allerdings sind die Strukturen, entlang derer die heißen Fluide auftreten mit schiffsgestützten Fächerecholoten, wie sie für Kartierungen auf den Weltmeeren eingesetzt werden, nicht erfassbar. So erscheint ein Vulkan des Woodlark Beckens, in dem es Hinweise auf Erze gibt (links) auf den vom Schiff aus erstellten bathymetrischen Karten nur undeutlich. Erst hochauflösende Kartierungen mittels tieftauchender autonomer Unterwasserfahrzeuge wie des AUV ABYSS erlauben ein besseres Verständnis der Bildungsbedingungen solcher Hydrothermalsysteme (rechts).

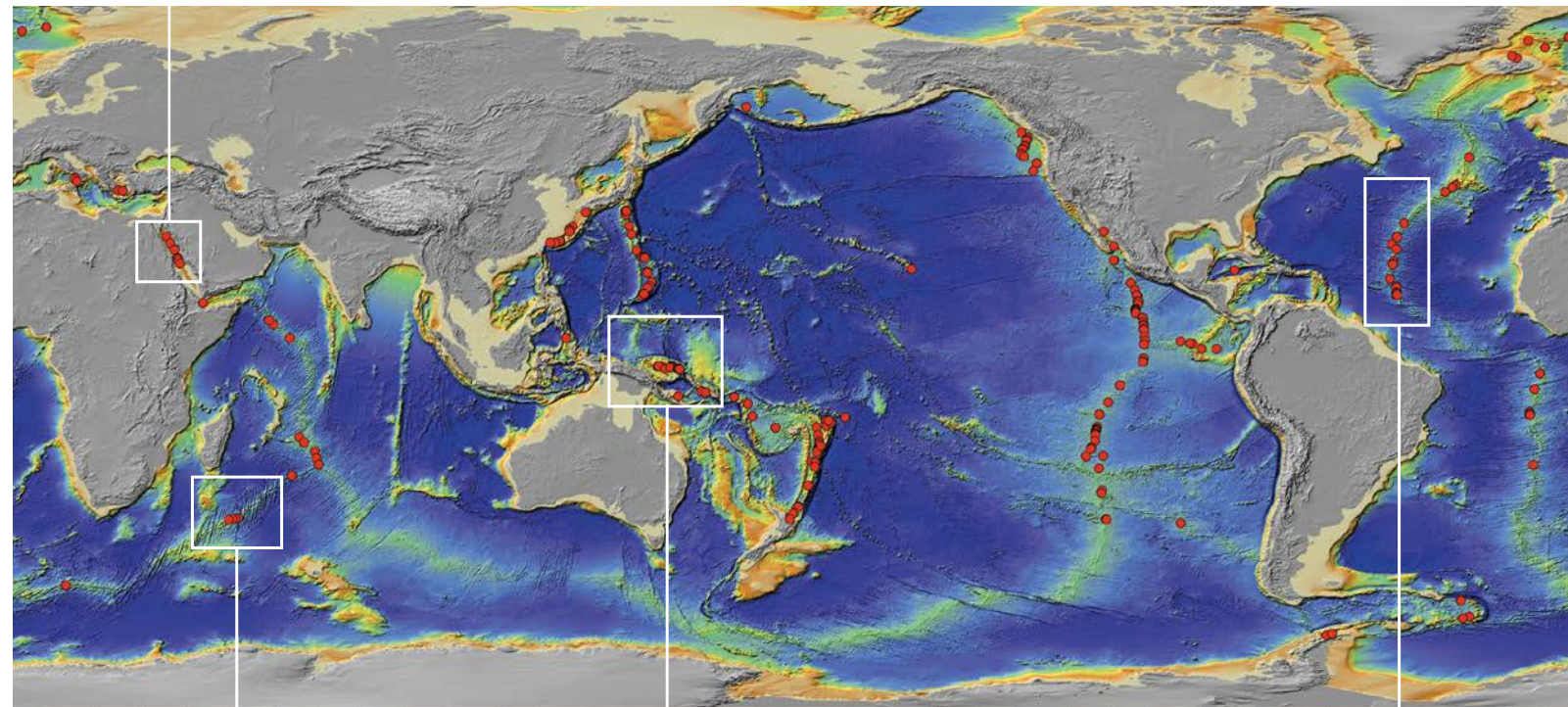


8 fallen die gelösten Metalle als Metallschwefelverbindungen (Sulfide) aus und setzen sich am und unterhalb des Meeresbodens ab. So entstehen die charakteristischen Kamine der Schwarzen Raucher und die Erzvorkommen in ihrer Umgebung. Aufgrund des schwefelreichen Wassers aus der Tiefe existieren an den Schwarzen Rauchern Mikroorganismen, die unabhängig vom Licht, z. B. aus der Umwandlung von Schwefelwasserstoff, ihre Energie beziehen. Auf der Grundlage dieser Chemosynthese haben sich spezielle Lebensgemeinschaften mit vielen endemischen Arten entwickelt.

Häufigkeit und Metallgehalt

Schwarze Raucher wurden erstmals 1979 am Ostpazifischen Rücken entdeckt. Lange Zeit nahm man an, dass sich diese Massivsulfide nur an schnell spreizenden ($> 10 \text{ cm / Jahr}$) Mittelozeanischen Rücken bilden, da hier die vulkanische Aktivität und Wärmeproduktion besonders hoch ist. Inzwischen sind aber mehr als 300 Vorkommen in allen Ozeanen und damit auch an langsam spreizenden Rücken bekannt. Es gibt gewaltige Unterschiede in der Größe (Tonnage) der Vorkommen. Die meisten haben weniger als hundert Meter Durchmesser und enthalten nur wenig Material (wenige 1.000 Tonnen). Es wird aber davon ausgegangen,

Rotes Meer



Südwestindischer Rücken

Manus Becken

Mittelatlantischer Rücken

Verteilung von Schwarzen Rauchern und Massivsulfidvorkommen in den Weltozeanen. Große Bereiche, insbesondere in den südlichen Ozeanen, sind bisher nicht untersucht worden und weisen nur deshalb keine Vorkommen auf (Stand 2015). Gebiete von besonderem wirtschaftlichem Interesse sind hervorgehoben.

Von links nach rechts:

Eine Vielzahl von Garnelen grast an einer Sulfidstruktur im Atlantik.

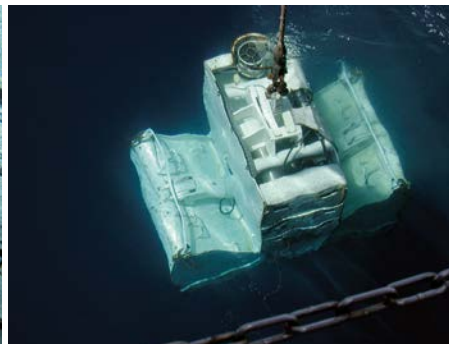
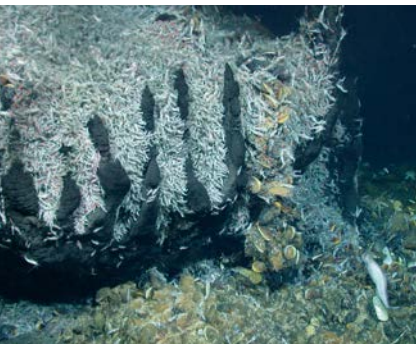
Nach erfolgreicher Probenahme werden die Handstücke nach geologischen Kennzeichen in verschiedene Gruppen unterteilt und beschrieben.

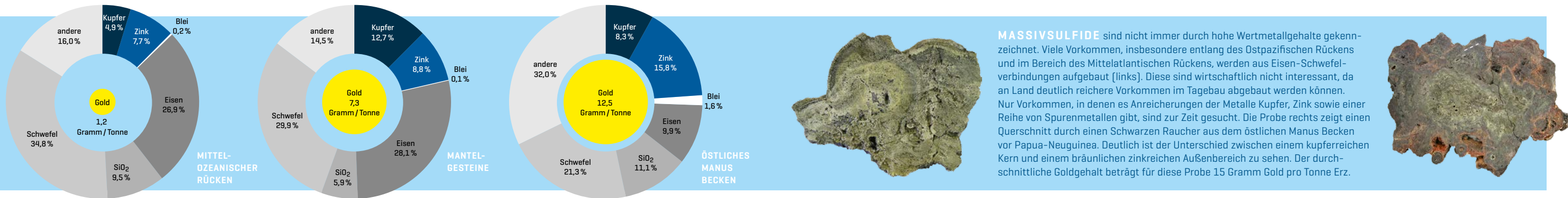
Die Gewinnung von Bohrkernen wie diesen aus dem Tyrrhenischen Meer ist unabdingbar für die Bestimmung von Tonnagen und Wertmetallgehalten innerhalb von Massivsulfidvorkommen.

Ein Riss im Meeresboden, an dem die heißen Lösungen aufsteigen können.

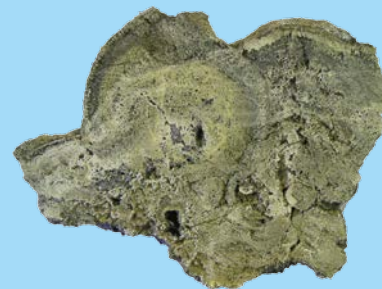
Ein fernsehgesteuerter Greifer dient der Großprobennahme und kann ca. $0,6 \text{ m}^3$ Material fördern.

Ein neuer Raucher beginnt auf einer sulfidreichen Kruste zu wachsen.

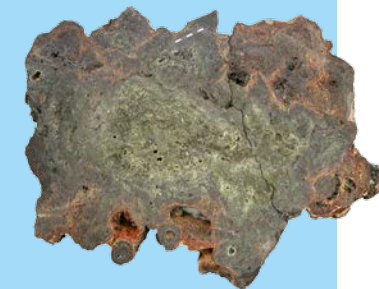




Metallgehalte [Gew. %] sowie Anteile an Gold in Massivsulfiden aus ausgewählten geologischen Umgebungen.



MASSIVSULFIDE sind nicht immer durch hohe Wertmetallgehalte gekennzeichnet. Viele Vorkommen, insbesondere entlang des Ostpazifischen Rückens und im Bereich des Mittelatlantischen Rückens, werden aus Eisen-Schwefelverbindungen aufgebaut [links]. Diese sind wirtschaftlich nicht interessant, da an Land deutlich reichere Vorkommen im Tagebau abgebaut werden können. Nur Vorkommen, in denen es Anreicherungen der Metalle Kupfer, Zink sowie einer Reihe von Spurenmetallen gibt, sind zur Zeit gesucht. Die Probe rechts zeigt einen Querschnitt durch einen Schwarzen 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.



10 dass am Meeresboden auch insgesamt 500 bis 1.000 größere Vorkommen existieren. Bisher sind aber nur wenige Massivsulfidvorkommen bekannt, die aufgrund ihrer Größe wirtschaftlich interessant wären. Erschwerend kommt hinzu, 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 langsam spreizenden 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,

z. B. 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 (mehrere Gramm pro Tonne) in solchen Sulfiden enthalten sein können und in eine wirtschaftliche Betrachtung einfließen könnten. Dazu gehören u. a. die Elemente Antimon, Germanium, Indium, Silber, Tellur und Wismut. Allerdings sind die Gehalte sehr großen Schwankungen unterworfen und die Ergebnisse der Untersuchungen zu ihrer Verteilung noch sehr lückenhaft. Die südwestpazifischen Vorkommen befinden sich zusätzlich in vergleichsweise geringen Wassertiefen (weniger als 2.000 m) und in den Wirtschaftszonen von Anrainerstaaten, was einem möglichen Abbau technologisch und rechtlich entgegen kommt. Bisher gibt es einige wenige Firmen, die sich für einen möglichen Abbau solcher Erze, z. B. in den Hoheitsgewässern von Papua-Neuguinea und Neuseeland, interessieren.

Eine dieser Firmen hat seit Januar 2011 die erste Abbau- lizenz für ein Vorkommen mit Schwarzen Rauchern in Papua-Neuguinea erhalten, und es wird derzeit davon ausgegangen, dass der Abbau Anfang 2018 beginnt. Hier liegen ca. 2 Mio. Tonnen Sulfid mit einem derzeitigen Metallwert von ca. 1 Mrd. US \$.

Größe der Vorkommen

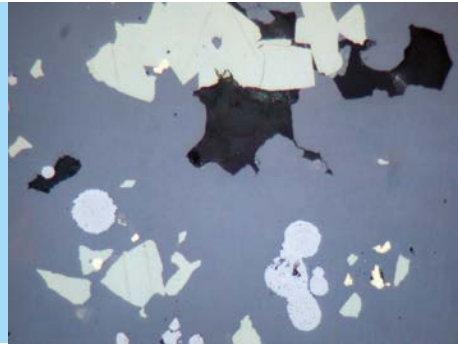
Das größte bekannte Sulfidvorkommen (Atlantis II-Tief) befindet sich im Roten Meer, wo tektonische Kräfte Afrika und die saudi-arabische Halbinsel auseinanderdriften lassen. Hier treten die Sulfide nicht als Schwarze Raucher sondern in Form eisenreicher Erzschlämme (90 Mio. Tonnen) mit erhöhten Gehalten an Kupfer (0,5 %), Zink (2 %), Silber (39 Gramm pro Tonne) und Gold (0,5 Gramm pro Tonne) auf. Dieses Vorkommen in Wassertiefen um die 2.000 Meter ist seit den 1960er Jahren bekannt. Dank der schlammigen

11

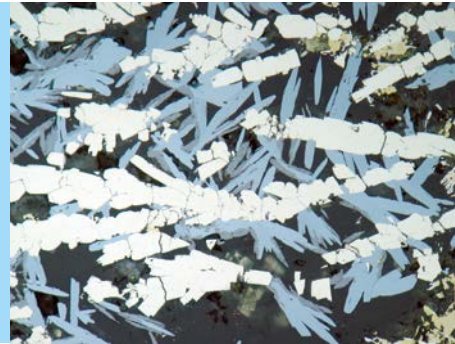
Unten links: Aussetzen des ROV KIEL 6000 (Foto: B. Grundmann).

Unten rechts: Erkundung des Meeresbodens mit dem bemannten Forschungstauchboot JAGO.

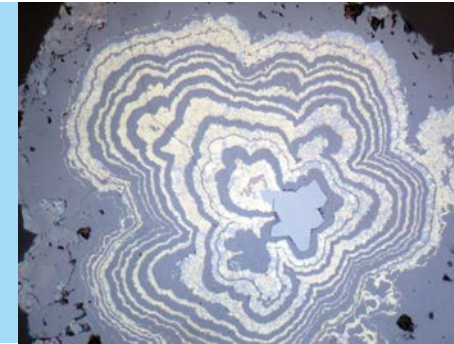




Wichtiger Bestandteil der Untersuchungen von Massivsulfiden ist die Erzmikroskopie. Dafür werden die Proben poliert und mit einem Auflichtmikroskop auf ihre Mineralbestandteile hin untersucht. Nur hiermit kann festgestellt werden, wie z. B. Gold in diesen Proben auftritt. Links finden sich kleine, hellgelbe Goldflitter als Einschlüsse in verschiedenen Sulfiden. Die Größe der Goldkörner liegt zwischen 2 – 10 Mikrometern.



Verwachsung von Pyrit (FeS_2 , creme-weiß) mit Hämatit (Fe_2O_3 , hellgrau) und Magnetit (Fe_3O_4 , mittelgrau). Die dunklen Farbtöne sind Hohlräume und dokumentieren die typische hohe Porosität der Erze vom Meeresboden. Bildbreite: ca. 0,1 mm.



Viele Massivsulfide zeigen auch in mikroskopischen Aufnahmen Hinweise für einen Zonarbau, der Jahresringen im Holz gleicht. In dem Beispiel links wechseln die physikochemischen Eigenschaften der heißen Lösungen sehr schnell und bilden Wechsellagerungen aus Zinksulfiden (ZnS , mittelgrau) und Kupfersulfiden (CuFeS_2 , gelb, hellgrau, braun). Bildbreite: 0,03 mm.

12

Konsistenz dieser Lagerstätten erscheint ein Abbau technisch unproblematisch und wurde bereits in den 1980er Jahren erfolgreich getestet. Der Wert dieses Vorkommens betrüge bei den derzeitigen Metallpreisen etwa 8 Mrd. US\$. Auch für dieses Vorkommen wurde 2010 eine auf 30 Jahre befristete Abbaulizenz gewährt, wobei noch nicht bekannt ist, wann mit einem Abbau begonnen werden soll.

In den letzten Jahren hat aber auch das politische Interesse an den Massivsulfiden in der Hohen See deutlich zugenommen. Seit 2011 haben 6 Länder Explorationslizenzen für Massivsulfide im Indischen und Atlantischen Ozean beantragt oder erhalten. Dazu gehört neben China, Russland, Frankreich, Südkorea und Indien auch Deutschland. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover hält seit Mai 2015 eine Lizenzgebiet von 10.000 km² im Indischen Ozean welches in den nächsten 15 Jahren auf sein Rohstoffpotential untersucht werden wird.

Links: Das Forschungsschiff METEOR wird seit 1986 für Arbeiten überwiegend im atlantischen Seeraum genutzt.

Mitte: Das neue Forschungsschiff SONNE wird seit 2015 für Arbeiten im Pazifik und Indik eingesetzt. Foto: T. Badewien, ICBM

Rechts: Das Forschungsschiff MARIA S. MERIAN arbeitet hauptsächlich im Bereich des Atlantik und seiner Randmeere.



Auswirkungen des Meeresbergbaus

Die Umweltauswirkungen eines Abbaus von Sulfidvorkommen am Meeresboden sind aufgrund der geringen Größe der Vorkommen regional zwar begrenzt, die Lebensgemeinschaften an den aktiven Rauchern würden dabei aber zerstört. Allerdings sind diese Lebensgemeinschaften aufgrund der vulkanischen Aktivität in diesen Regionen durchaus an katastrophale Ereignisse wie z. B. vulkanische Eruptionen angepasst, wobei die genauen Prozesse der Wiederbesiedlung jedoch nicht vollständig geklärt sind. Bei einem Abbau von Erzen aus aktiven Vorkommen mit Schwarzen Rauchern wird die Zufuhr der heißen Lösungen aus dem

Untergrund nicht abgeschnitten, daher ist eine Wiederbesiedlung von anderen heißen Quellen in der Umgebung nach der Abbauphase wahrscheinlich. Für den zukünftigen Abbau in Papua-Neuguinea wurde deshalb darauf geachtet, Ausgleichsflächen mit allen Lebewesen auszuweisen, von denen aus eine Neubesiedlung oder sogar Umsiedlung möglich ist.

Der Abbau von Massivsulfiden scheint derzeit in den Hoheitsgewässern von Staaten des Westpazifiks (z. B. Papua-Neuguinea) am ehesten wahrscheinlich, da sich für einzelne Unternehmen der Abbau aufgrund des relativ hohen Gehalts an wertvollen Metallen hier besonders lohnen könnte. Die Tonnagen der Massivsulfidvorkommen der Tiefsee sind insgesamt allerdings meist deutlich kleiner als diejenigen von vergleichbaren Erzlagerstätten an Land. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass der marine Bergbau auf Massivsulfide einen entscheidenden Einfluss auf die weltweite Rohstoffversorgung hat, er wird allenfalls einen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten können.

13

IMPRESSUM

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1 – 3 | 24148 Kiel

Text: Dr. Sven Petersen [spetersen@geomar.de]

Layout: Rita Erven

Druck: Dräger und Wullenwever, Lübeck

Auflage: 1.500 | Stand: Januar 2016

Abbildungen, soweit nicht anders angegeben: © GEOMAR

Das GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

14

Am GEOMAR wird der Ozean vom Meeresboden bis zur Atmosphäre erforscht. Schwerpunkte bilden die Rolle des Ozeans im globalen Klimawandel, menschliche Auswirkungen auf marine Ökosysteme, marine Ressourcen und marine Naturgefahren. Die Forschungsschwerpunkte sind in vier zentralen Bereichen zusammengefasst: Ozeanzirkulation und Klimadynamik, Marine Biogeochemie, Marine Ökologie sowie Dynamik des Ozeanbodens.

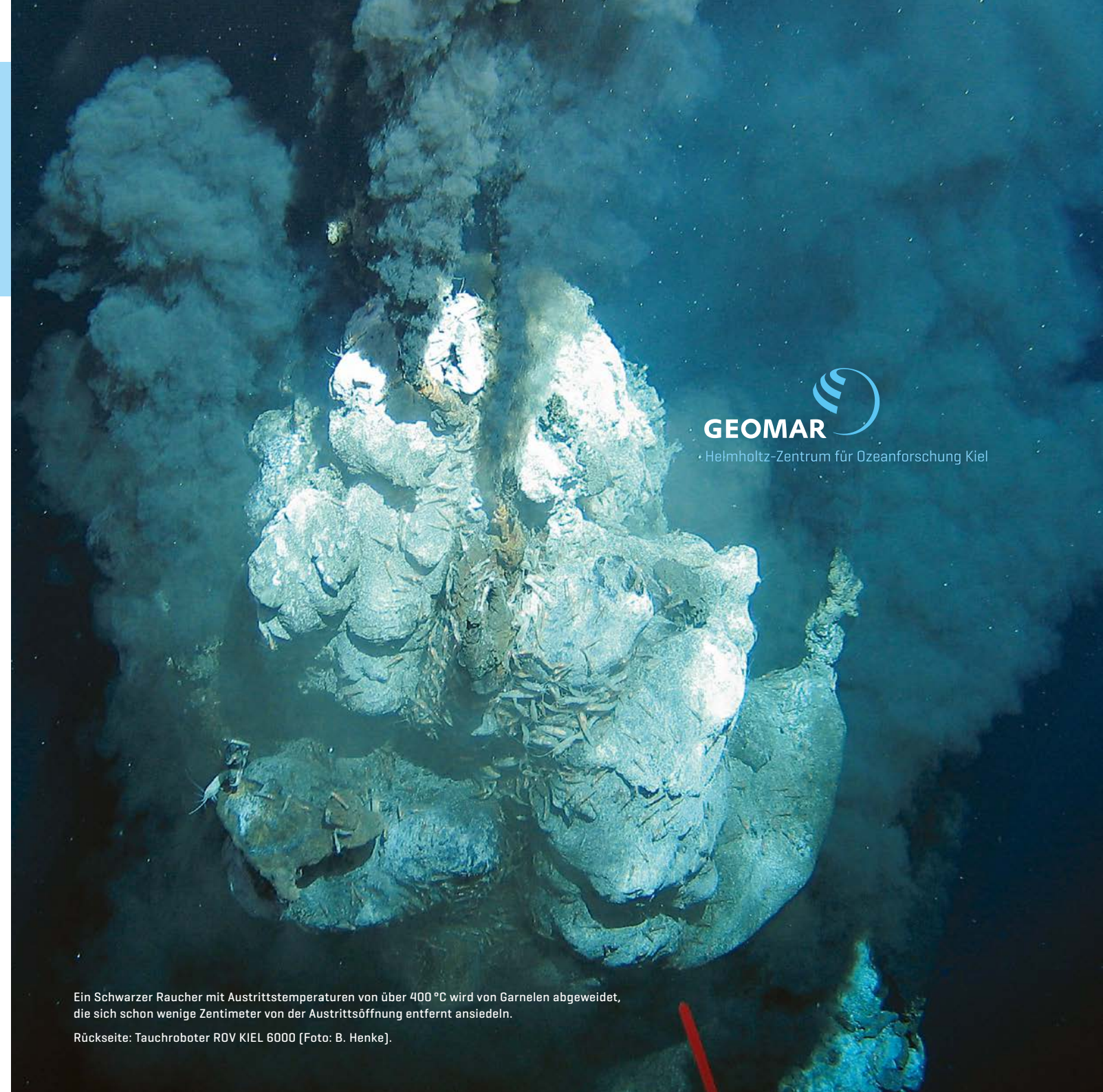
Hinzu kommen große langjährige Forschungsprojekte, die in enger Kooperation mit der Kieler Universität durchgeführt

werden, wie der Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ und Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Die rund 950 Mitarbeiter setzen modernste Methoden bei der Forschung ein und vermitteln aktuelle Forschungserkenntnisse an Studierende und Nachwuchswissenschaftler. Zur Infrastruktur des GEOMAR gehören vier Forschungsschiffe, das bemannte Forschungstauchboot JAGO, drei Tiefseeroboter, komplexe Beobachtungssysteme, vielfältige Speziallabore sowie hochauflösende Klima- und Ozeanmodelle.



Links: Das AUV ABYSS bewegt sich nach einem Einsatz auf das Forschungsschiff Meteor zu.

Rechts: Mobile Bohrgeräte, zum Beispiel vom British Geological Survey, werden zur Erkundung des Untergrunds eingesetzt.



Ein Schwarzer Raucher mit Austrittstemperaturen von über 400 °C wird von Garnelen abgeweidet, die sich schon wenige Zentimeter von der Austrittsöffnung entfernt ansiedeln.

Rückseite: Tauchroboter ROV KIEL 6000 (Foto: B. Henke).