

The “Vertical Approach” – a Sustainable Solution for Deep-Sea Mining and Sampling

The discovery of Seafloor Massive Sulfides (SMS) occurred in the Galapagos Rift area in 1977. A few years later, the former German mining company PREUSSAG AG started with the exploration of these newly discovered mineral resources followed by a first harvesting campaign of 30 t of massive sulfides collected with big TV-controlled grabs.

In contrast to conventional mining concepts the “Vertical Approach” method takes the three-dimensional conic shape of the SMS deposits into consideration, where the deeper portions of the deposit are getting more and more narrow. This

approach is very selective and minimizes the recovery of lean ore rock material and thereby improves the efficiency of the method. The Vertical Approach uses the proven and tested trench cutter technology for loosening the ore and pumping the broken-down material into a collector bucket. There it is separated from the process water and lifted to the support vessel in a discontinuous process. The main focus of the Vertical Approach is on providing not only efficient but also a sustainable technology for future SMS-mining by minimizing the ecological footprint.

Der „Vertical Approach“ – eine nachhaltige Lösung für Probenahme und Bergbau in der Tiefsee

Die Entdeckung von marinen Massivsulfiden fand im Jahr 1977 in der Nähe der Galapagos-Inseln statt. Bereits wenige Jahre später unternahm das ehemalige deutsche Bergbauunternehmen PREUSSAG AG die erste kommerzielle Exploration dieser neu entdeckten marinen Bodenschätze, gefolgt von einer zweiten Kampagne, bei der 30 t des Massivsulfidzerzes mit Hilfe von großen TV-Greifern gewonnen werden konnten.

Im Gegensatz zu konventionellen Bergbaumethoden berücksichtigt das hier vorgestellte „Vertical Approach“-Verfahren die kegelförmige, sich nach unten verjüngende Ausdehnung der Lagerstätten. Mit der vertikalen Methode kann sehr selektiv gearbeitet

werden und dadurch der Abbau von Taubgestein erheblich minimiert werden, was zur Steigerung der Effizienz dieser Abbautechnologie beiträgt. Bei diesem Verfahren wird zum Lösen und Transport des zerkleinerten Gesteins die bereits im Tiefbau bewährte Schlitzwandfräsentechnologie verwendet. Das so zerkleinerte Massivsulfidzerz wird in einen Behälter gepumpt und dort vom Prozesswasser separiert. Der Behälter wird dann mit einer Seilwinde aufs Förderschiff gehoben. Das Hauptaugenmerk des Vertical Approach liegt darauf, nicht nur eine effiziente, sondern auch nachhaltige Methode für den Massivsulfidbergbau zu liefern und so den ökologischen Fußabdruck zu minimieren.

1 Seafloor Massive Sulfides – a promising mineral resource from the deep ocean seafloor

As a short introduction to the Seafloor Massive Sulfides (SMS) subject, a brief report is presented on how it happened in the year 1977, when mankind got the very first glance at Black Smokers active on the seafloor of the Galapagos Rift (1, 2).

“Wait a minute! What is that?”

It was February 1977, and Robert Ballard, a marine geologist at Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), sat aboard the research vessel Knorr about 800 km off the South American coast, staring at photos before him.

“I think there’s shimmering water right over here to the left, coming out right off the top.”

1 Marine Massivsulfide – ein vielversprechender mineralischer Rohstoff am Grund der Tiefsee

Als kurze Einführung zu marinen Massivsulfiden folgt ein kurzer Bericht über die Ereignisse im Jahr 1977, als die Menschheit den ersten Blick auf die Schwarzen Raucher am Meeresboden nahe der Galapagos-Inseln erhielt (1, 2).

„Moment mal – was ist das denn?“

Es war im Februar 1977, als Robert Ballard, Meeresgeologe der Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), etwa 800 km entfernt von der südamerikanischen Küste an Bord des Forschungsschiffes Knorr ungläubig auf die vor ihm ausgebreiteten Fotos schaute.

„Hier oben links, da kommt schimmerndes Wasser oben aus der Spitze.“

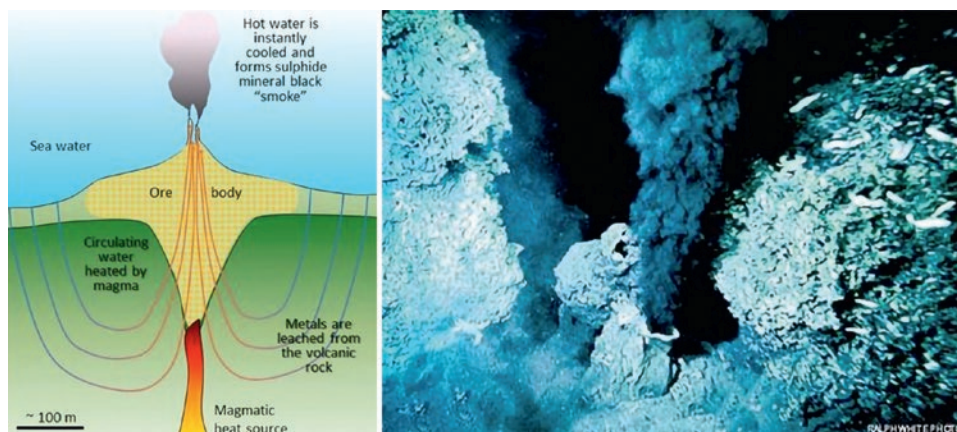


Fig. 1. A model of the formation of a volcanogenic massive sulfide deposit on the sea floor (left). Hot seawater in hydrothermal vents does not boil because of the extreme pressure at the depths where the vents are formed (right). (3)

Bild 1. Modell der Formation vulkanischer Massivsulfid-Ablagerungen am Meeresboden (links). Aufgrund des hohen Drucks in der Tiefe, in der sich hydrothermale Quellen bilden, erreicht das Wasser nicht den Siedepunkt (rechts). (3)

Cameras towed 2,500 m below the surface had taken the photos. They unveiled a discovery that would turn our understanding of life on Earth on its head: Warm water was drifting out of the seafloor along the Galapagos Rift.

Today it is known that Seafloor Massive Sulfides form through hydrothermal activities, where cold seawater percolates down through the seafloor, is heated through geothermal energy, becomes buoyant and rises, dissolving metals and sulfides from the surrounding rocks (Figure 1).

The hot, minerals-enriched waters rising back from the seafloor underground roughly can be distinguished in low intensity "white smokers" (typically $200\text{ }^{\circ}\text{C}$), which are generally thought unimportant for the formation of SMS deposits, or high-intensity (typically 200 to 400 °C) "black smokers", which tend to concentrate mineral deposits. Especially latter often are sites, where economically interesting amounts of SMS are formed. These hydrothermal systems in general occur at tectonic plate boundaries, e. g., mid ocean ridges, subduction zones, back-arc tectonics, etc. (Figure 2).

Active hydrothermal systems, e. g., black and white smokers, hydrothermal mounds, etc., often host special and invaluable eco-systems, which in general are agreed upon to be protected areas. For that reason these active hydrothermal SMS fields are not considered for exploitation, i. e. for deep-sea mining activities.

Die Fotos stammten von Kameras, die bis in 2.500 m Wassertiefe abgeseilt worden waren. Sie lieferten die ersten Aufzeichnungen einer Entdeckung, die unser Verständnis vom Leben auf der Erde revolutionieren sollte: Aus dem Meeresboden entlang des Galapagos-Hotspots drang warmes Wasser hervor.

Heute ist bekannt, dass marine Massivsulfide durch hydrothermale Aktivitäten entstehen, wenn kaltes Meerwasser durch den Meeresboden nach unten diffundiert, dort durch geothermale Energie erhitzt wird, wodurch es Auftrieb erhält, emporsteigt und dabei Metalle und Sulfide aus dem umgebenden Gestein löst (Bild 1).

Man unterscheidet grob zwischen zwei Arten dieser heißen, mineralangereicherten Liquide, die vom Meeresgrund emporsteigen: sogenannte „Weiße Raucher“ mit niedriger Intensität (typischerweise $200\text{ }^{\circ}\text{C}$), die als gering bedeutend für die Bildung von Massivsulfiden eingeschätzt werden, sowie „Schwarze Raucher“ mit hoher Intensität (typischerweise 200 bis 400 °C), die oft konzentrierte Mineralablagerungen bilden. Vor allem an den Schwarzen Rauchern treten oft wirtschaftlich interessante Mengen mariner Massivsulfide auf. Allgemein sind diese hydrothermalen Systeme an tektonischen Plattengrenzen, z. B. an mittelozeanischen Rücken, Subduktionszonen, Backarc-Becken etc., zu finden (Bild 2).

Active hydrothermale Systeme wie Schwarze und Weiße Raucher etc. beherbergen oft einzigartige und wertvolle Ökosysteme, die allgemein als Schutzzonen anerkannt sind. Diese aktiven hydrothermalen marinen Massivsulfidvorkommen kommen daher für eine Ausbeutung, wie etwa durch den Tiefseebergbau, nicht infrage.

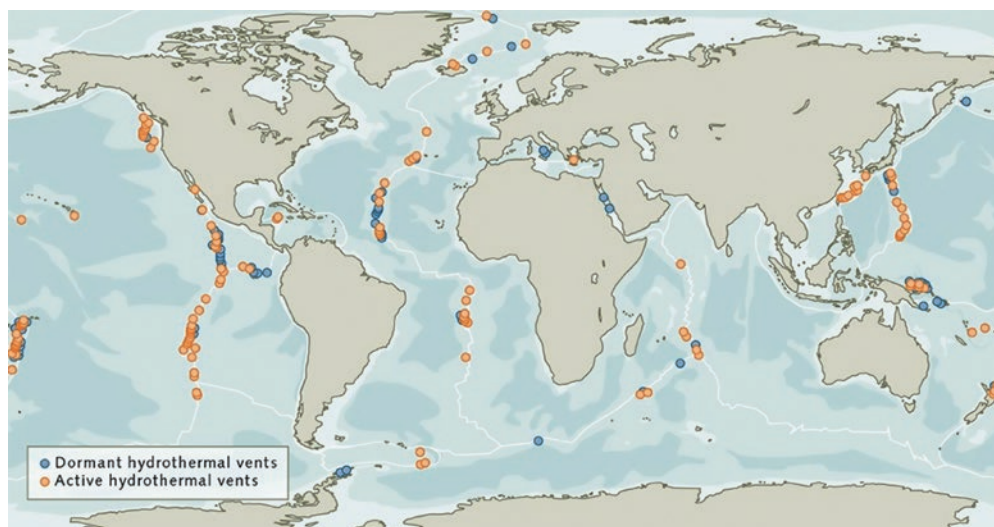


Fig. 2. Global distribution of SMS deposits. Red circles: active deposits; blue circles: inactive deposits. Note that more deposits are known.

Bild 2. Globale Verteilung mariner Massivsulfid-Lagerstätten. Rote Kreise: aktive Lagerstätten; blaue Kreise: inaktive Lagerstätten. Hinweis: weitere Lagerstätten sind bekannt.

Source/Quelle: InterRidge-Datenbank, 2016

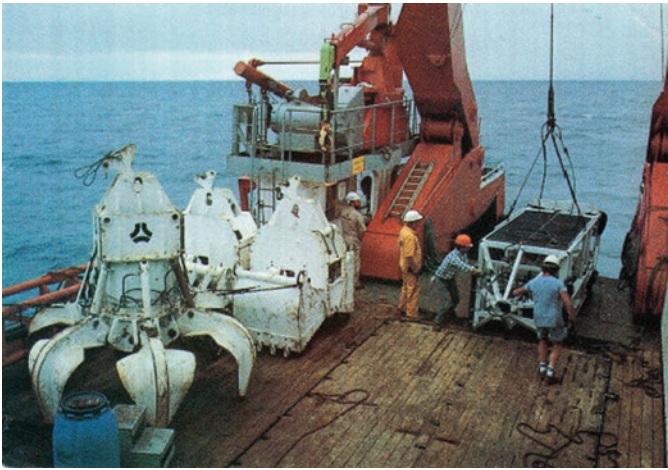


Fig. 3. Three remote-controlled TV-grabs on the deck of RV SONNE.
 Bild 3. Drei ferngesteuerte TV-Greifer an Bord des Forschungsschiffs SONNE.
 Photo/Foto: HYDROMOD

2 Early approaches to collect seafloor massive sulfides with remote-controlled TV-grabs new sampling and mining approaches using various types of grabs

It was only a few years later when, at the beginning of the 1980s, the former German mining company PREUSSAG AG together with the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) started a first exploration campaign within this area of the Galapagos Rift. One of the main goals of this exploration campaign was already to study the amount and mineral content of these black smokers, in the meantime named "Seafloor Massive Sulfides" (SMS). The industry's geologists and mining engineers expected to find large areas of valuable mineral resources here that were urgently needed for the prospering German economy, which relied almost 100% on the import of metallic minerals.

After having explored several hydrothermally active and inactive seafloor areas along the Galapagos Rift and the East Pacific Rise, PREUSSAG decided to proceed with studying appropriate processing approaches. For that reason, about two years later in the early eighties, a second campaign was carried out at the Galapagos Rift in order to recover at least an amount of about 30 t.

Due to the fact that in those early years the vertical dimension of hydrothermal deep ocean sites and their mineral resources potential was not known in detail or was not yet in the focus of mining engineers, three different types of grabs (Figure 3) were designed to collect broken chimneys out of massive sulfidic rock from the seafloor's surface.

These TV-equipped grabs were able to work down to a water depth of 6,000 m. During the SMS exploration and harvesting campaign, PREUSSAG picked up more than 30 t of massive sulfides (broken pieces of black smokers).

3 The "Vertical Approach" concept

3.1 Background

The so-called Vertical Approach is a method for extracting seafloor massive sulfides using the proven and tested trench cutter technology operated from and supported by a vessel in the deep-sea environment. The idea for this new concept was born when

2 Frühe Ansätze zum Abbau mariner Massivsulfide mittels ferngesteuerter TV-Greifer – neue Ansätze für Beprobung und Bergbau mit verschiedenen Typen von Greifern

Nur wenige Jahre später, Anfang der 1980er Jahre, begann das damalige deutsche Bergbauunternehmen PREUSSAG AG gemeinsam mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die erste Exploration im Bereich des Galapagos-Rifts. Eines der Hauptziele dieser Exploration war bereits damals die Erforschung der Menge und des Mineralgehalts der Schwarzen Raucher, die mittlerweile als marine Massivsulfide bezeichnet wurden. Die Geologen und Bergbauingenieure der Industrie erhofften sich große Vorkommen mit wertvollen mineralischen Rohstoffen zu finden, auf welche die prosperierende deutsche Wirtschaft, die nahezu vollständig vom Import metallischer Rohstoffe abhängig ist, dringend angewiesen war.

Nach der Erkundung mehrerer hydrothermal aktiver und inaktiver Meeresbodenareale entlang des Galapagos-Rifts und am Ostpazifischen Rücken entschloss sich die PREUSSAG, geeignete Aufbereitungsverfahren für die Massivsulfide zu entwickeln. So kam es, dass bereits zwei Jahre später ein zweites Explorationsprogramm am Galapagos-Rift durchgeführt wurde, das mindestens 30 t dieser Massivsulfiderze fördern sollte.

Da die vertikale Dimension der hydrothermalen Erzvorkommen in der Tiefsee und das darin liegende Rohstoffpotential in diesen anfänglichen Jahren nicht im Detail bekannt waren oder noch nicht im Fokus der Aufmerksamkeit der Bergbauingenieure standen, wurden drei verschiedene Typen von Greifern (Bild 3) konstruiert, die abgebrochene Schloten aus massiven Sulfiderzen von der Oberfläche des Meeresbodens aufsammelten.

Diese TV-Greifer konnten bis zu einer Wassertiefe von 6.000 m eingesetzt werden. Im Zuge dieses Erkundungs- und Gewinnungsprogramms sammelte die PREUSSAG damals mehr als 30 t Massivsulfiderze in Form von Bruchstücken der Schwarzen Raucher vom Meeresboden auf, die für spätere Laboruntersuchungen zur Entwicklung von Aufbereitungsverfahren benötigt wurden.

3 Das Konzept des „Vertical Approach“

3.1 Hintergrund

Der sogenannte Vertical Approach ist eine Methode zur Entnahme mariner Massivsulfide über das bewährte Schlitzwandverfahren, die von einem Schiff aus in der Tiefsee-Umgebung betrieben und unterstützt wird. Die Idee zu diesem Konzept entstand in Gesprächen zwischen der BAUER Maschinen GmbH, Schrobenuhausen, und der Harren & Partner Group, Bremen, zu Möglichkeiten der Kombination der Expertise der beiden Unternehmen und zur Entwicklung neuer Strategien zu nachhaltigen Bergbaukonzepten in Übereinstimmung mit den Normen der internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA).

Die ISA kontrolliert die Tiefseebergbau-Aktivitäten außerhalb nationaler Rechtsprechungen. Länder oder Firmen können gebietsgebundene Lizenzen zur Durchführung von Explorationsprogrammen erwerben. Diese Lizenzen werden von der ISA verwaltet. Lizenzinhaber müssen bestimmte Bedingungen wie beispielsweise Zeitpläne für ihre Untersuchungsaktivitäten, Umweltbestimmungen und Berichterstattung an die ISA ein-

BAUER Maschinen GmbH, Schrobenhausen/Germany, and the Harren & Partner Group, Bremen/Germany, discussed opportunities for combining their expertise and developing new strategies for sustainable mining concepts in compliance with the standards of the International Seabed Authority (ISA).

The ISA is in control of deep-sea mining activities outside national jurisdiction. Countries or companies can acquire licenses for certain areas in order to carry out exploration activities. These licenses are managed by the ISA and certain conditions have to be met by the license holders, e.g., timelines for investigation activities, compliance to environmental regulations and reporting to the ISA. According to the "Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration of marine minerals in the area" (4), tests of mining components or test mining are an opportunity to determine the environmental implications of mining. Moreover, in these recommendations, mechanical removal without initial processing at the seabed was deemed the most likely to be used (as mining technology used for test mining and testing of mining components) and is the method of mineral extraction assumed (5).

Taking these recommendations into consideration, the Vertical Approach, as a relatively small-scale operation with minimized arial and environmental footprint, would be an ideal method for test mining and exploration of SMS deposits.

3.1.1 Harren & Partner

The Harren & Partner Group was founded more than 30 years ago. The shipping group delivers the full range of services related to the entire life cycle of ships. The core activities are the technical and nautical management of their own fleet consisting of 75 vessels of different type, e.g., tankers, bulk carriers and heavy lift vessels and the teams specialized for the different types of ships. Moreover, Harren & Partner offers technical engineering, consultancy and site support services for international projects.

3.1.2 BAUER Maschinen GmbH

BAUER was founded as a copper forge in 1790. The family run company developed and became one of the worldwide leading construction companies in the field of special foundation engineering (BAUER Spezialtiefbau). In 1976 BAUER designed and built the first rotary drilling rig for foundation construction and in 1984 the first diaphragm wall trench cutter was built. BAUER started building and selling foundation construction equipment to clients worldwide. In 2001, BAUER Maschinen GmbH was founded and is the world market leader in the development and manufacture of specialist foundation engineering equipment.

3.1.3 Proven and tested technology

The partnership between BAUER Maschinen GmbH and Harren & Partner combines knowledge and experience in the field of offshore technology and services with expertise in manufacturing and operating foundation construction equipment for clients worldwide both onshore and offshore. Therefore, access to the full portfolio of technical expertise and services of the two partners is provided. Moreover, the utilization of proven and tested technology minimizes the risk for all parties.

halten. Gemäß den „Empfehlungen zur Anleitung von Auftragnehmern zur Bewertung der möglichen Umweltauswirkungen mariner Mineralexploration auf dem Gebiet“ (4) bieten Testeinsätze von Bergbaukomponenten bzw. der Testbergbau eine Möglichkeit, die Auswirkungen des Bergbaus auf die Umwelt abzuschätzen. Die Empfehlungen gehen darüber hinaus davon aus, dass die mechanische Entnahme ohne Weiterverarbeitung am Meeresboden am ehesten infrage kommt (als Bergbautechnologie im Testbergbau und bei Testeinsätzen von Bergbaukomponenten). Diese Entnahmemethode wird daher als Standardverfahren vorausgesetzt (5).

In Anbetracht dieser Empfehlungen bietet der Vertical Approach als relativ kleinmaßstäbiger Eingriff mit minimiertem ökologischem Fußabdruck eine ideale Methode für den Testbergbau und zur Erkundung der Vorkommen.

3.1.1 Harren & Partner

Die Harren & Partner Group wurde vor mehr als 30 Jahren gegründet. Die Reedereigruppe bietet das volle Dienstleistungsspektrum innerhalb des gesamten Lebenszyklus eines Schiffs an. Kerngeschäft ist die technische und nautische Betreuung der eigenen Flotte aus 75 Schiffen verschiedener Typen wie Tanker, Massengutfrachter oder Schwergutfrachter sowie der auf die verschiedenen Schiffstypen spezialisierten Mannschaften. Außerdem bietet Harren & Partner technische Ingenieurleistungen, Beratung und Unterstützungsdienstleistungen vor Ort für internationale Projekte an.

3.1.2 BAUER Maschinen GmbH

BAUER wurde im Jahr 1790 als Kupferschmiede gegründet. Das familiengeführte Unternehmen hat sich seitdem zu einem der weltweit führenden Bauunternehmen im Spezialtiefbau (BAUER Spezialtiefbau) entwickelt. Im Jahr 1976 entwarf und baute BAUER die erste Großbohranlage für den Tiefbau und 1984 die erste Schlitzwandfräse. Bald baute und verkaufte BAUER Tiefbaugeräte an Kunden in aller Welt. Im Jahr 2001 wurde die BAUER Maschinen GmbH gegründet und ist heute Marktführer in der Entwicklung und Herstellung von Spezialtiefbaugerät.

3.1.3 Erprobte und bewährte Technologien

Die Partnerschaft zwischen der BAUER Maschinen GmbH und Harren & Partner vereint Fachwissen und Erfahrung auf dem Gebiet Offshore-Technologie und -Dienstleistungen mit Expertise in der Herstellung und im Betrieb von Tiefbaugerät für Onshore- und Offshore-Kunden auf der ganzen Welt. Somit ist der Zugriff auf das volle Portfolio der technischen Expertise und der Dienstleistungen beider Partner gewährleistet. Die Verwendung erprobter und bewährter Technologien minimiert zudem das Risiko für alle Beteiligten.

3.1.3.1 Schlitzwandverfahren

Das Schlitzwandverfahren wird üblicherweise im Spezialtiefbau beim Bau verdichteter Ort betonwände für Tiefgaragen, unterirdischer Schachtwände etc. eingesetzt (Bild 4). Dichtwände kommen außerdem in Stützbauwerken wie Talsperren oder zur Einkapselung von Altlasten und Bergeteichen zum Einsatz.



Fig. 4. Trench cutter on a dike rehabilitation project.
Bild 4. Schlitzwandfräse bei einer Deichsanierung. Photo/Foto: BAUER

3.1.3.1 Trench cutter technology

The trench cutter technology is typically used in the field of specialist foundation engineering for building reinforced in-situ concrete walls for underground car parks, underground shaft walls, etc. (Figure 4). Cut-off walls are also utilized for water retaining structures, such as dams or the encapsulation of contaminated sites and tailing ponds.

The centerpiece of the system, the actual BAUER trench cutter, consists of a steel frame with two gearboxes attached at its base (Figure 5). In operation, they rotate in opposite directions around a horizontal axis. Cutting wheels equipped with teeth suitable for the prevailing ground conditions are mounted on the gearboxes. The ground material – the whole spectrum from soft soils to hard rock – is continuously loosened, broken down and pumped to the surface. Before the material enters the pump, it has to pass through a suction box with an opening diameter of 75 mm, otherwise the cutter wheels will break it up until it fits through.

Besides cut-off wall construction, the trench cutter technology has been used for mining applications in the past, e.g., with diamond exploration in Kimberlite deposits in Canada.

3.1.3.2 Maritime technologies

The first project where a trench cutter was used in a maritime environment was executed in 1994. BAUER carried out a diamond exploration job at a water depth of 200 m with a trench cutter on a vessel offshore of Namibia.

Since 2005, BAUER has developed, tested and sold various systems for building offshore foundations, e.g., for offshore wind farms or tidal turbines for maximum water depths of 250 m. BAUER technology is used not only for offshore foundations, but also in the field of subsea exploration. The deep-sea coring system “MeBo” (Figure 6) was developed in cooperation with the MARUM Center for Marine Environmental Sciences of the Bremen University. This development has been continuing since 2016.

3.2 Equipment

For the mining of SMS deposits in the deep sea with a trench cutter (Vertical Approach), most of the necessary equipment already exists and has been tested. Furthermore, there are heavy lifting vessels available which are equipped with cranes and winches

- 1 Cutter wheels
- 2 Suction box
- 3 Gear box
- 4 Cutter frame
- 5 Cutter pump
- 6 Combined electric and hydraulic box
- 7 Steering flaps
- 8 Extensions

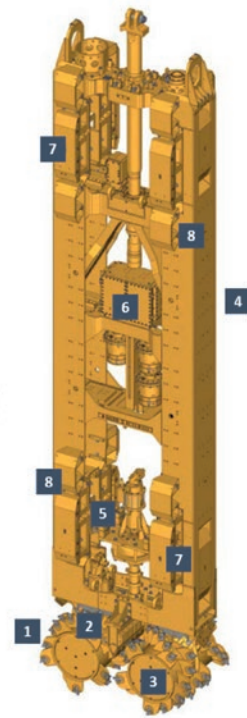


Fig. 5. Schematic of the trench cutter. // Bild 5. Schematische Zeichnung der Schlitzwandfräse. Source/Quelle: BAUER Maschinen GmbH

Das Herzstück des Systems, die BAUER-Schlitzwandfräse, besteht aus einem Stahlrahmen mit zwei an der Basis befestigten Getrieben (Bild 5). Im Betrieb rotieren diese in gegenläufiger Richtung um eine horizontale Achse. Fräsräder mit der jeweils für die vorherrschenden Bodenbedingungen geeigneten Zahnbestückung werden auf den Getrieben montiert. Das Bodenmaterial – aus dem vollen Spektrum von weichen Böden bis zu hartem Fels – wird so kontinuierlich aufgelockert, aufgebrochen und an die Oberfläche gepumpt. Bevor das Material in die Pumpe gelangt, muss es einen Saugkasten mit 75 mm Öffnungsdurchmesser passieren. Die Fräsräder brechen das Material so lange auf, bis es durch die Öffnungen passt.

Neben dem Bau von Dichtwänden wurde das Schlitzwandverfahren bereits in der Vergangenheit im Bergbau eingesetzt, z. B. zur Diamantexploration in Kimberlit-Lagerstätten in Kanada.

3.1.3.2 Maritime Technologien

Der erste Einsatz einer Schlitzwandfräse in maritimer Umgebung erfolgte 1994. BAUER führte damals eine Diamantexploration in einer Wassertiefe von 200 m mit einer Schlitzwandfräse von einem Schiff aus vor der Küste Namibias durch.

Seit 2005 hat BAUER verschiedene Systeme zum Bau von Offshore-Gründungen entwickelt, getestet und verkauft, beispielsweise für Offshore-Windanlagen oder Gezeitenturbinen für eine maximale Wassertiefe von 250 m. BAUER-Technologie kommt jedoch nicht nur für Offshore-Gründungen, sondern auch im Bereich der Unterwasserexploration zum Einsatz. Das System „MeBo“ zur Herstellung von Tiefsee-Kernbohrungen (Bild 6) wurde in Zusammenarbeit mit dem MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen entwickelt. Die Entwicklung läuft kontinuierlich seit 2016.



Fig. 6. Launching MeBo from a vessel. // Bild 6. MeBo im Einsatz von einem Schiff aus. Photo/Foto: MARUM, 2016

and the necessary deck space for the mining equipment with auxiliary parts and offering the storage capacity for the mined ore (Figure 7).

An umbilical winch with a 3,000 m deep-sea cable, work-class remotely operated vehicles (WROVs) for the handling of rigging, servicing and monitoring in the deep sea and other auxiliary equipment, i.e. control container and hydraulic power packs, are readily available on the market.

Only the core piece of the operation, the sampling unit, consisting of a trench cutter with template, the collector bucket and ore container, and the deep-sea hydraulic power pack for the trench cutter (Figure 8) have to be further developed for this operation. The collector bucket itself has a weight of approximately 35 t. It is designed to hold 100 t of ore.

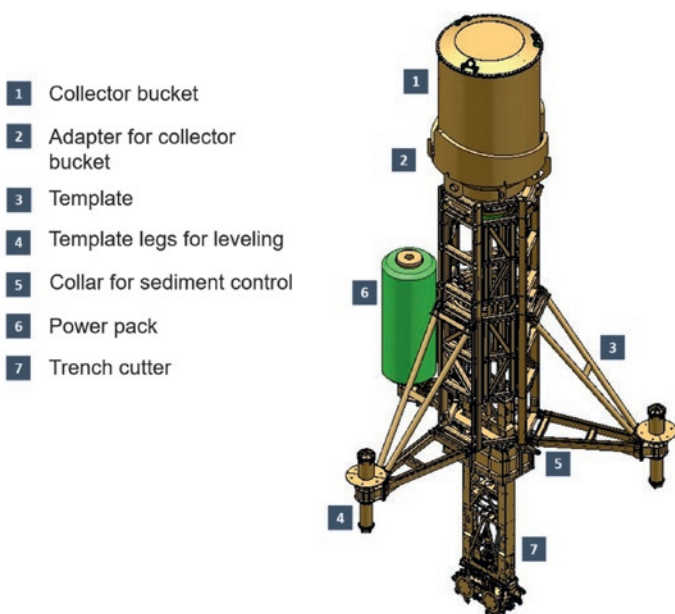


Fig. 8. Current design sampling unit. // Bild 8. Aktuelle Planung der Sampling-Einheit. Source/Quelle: BAUER Maschinen GmbH

3.2 Maschinen

Für den Abbau mariner Massivsulfide in der Tiefsee mittels Schlitzwandfräse (Vertical Approach) existiert das notwendige Gerät größtenteils bereits und wurde erfolgreich getestet. Darüber hinaus stehen mit Kränen und Seilwinden ausgestattete Schwergutfrachter mit der erforderlichen Deckfläche für das Abbaugerät samt Hilfsteilen sowie der Lagerkapazität für das abgebaute Erz zur Verfügung (Bild 7).

Versorgungsseilwinden mit 3.000 m Tiefseekabel, ferngesteuerte Tauchfahrzeuge der Leistungsklasse Work-class (Work-class Remotely Operated Vehicles, WROVs) zur Unterstützung der Absenkung, Wartung und Überwachung in der Tiefe sowie weiteres Hilfsgerät, wie z.B. Steuercontainer und Hydraulikaggregate, sind auf dem Markt erhältlich.

Lediglich das Kernstück der Operation, die Sampling-Einheit, bestehend aus einer Schlitzwandfräse mit Schablone, einem Erzcontainer sowie dem Hydraulikaggregat für die Schlitzwandfräse (Bild 8) müssen für die Operation weiterentwickelt werden. Der Erzcontainer selbst wiegt etwa 35 t. Er hat eine Kapazität von bis zu 100 t Erz.

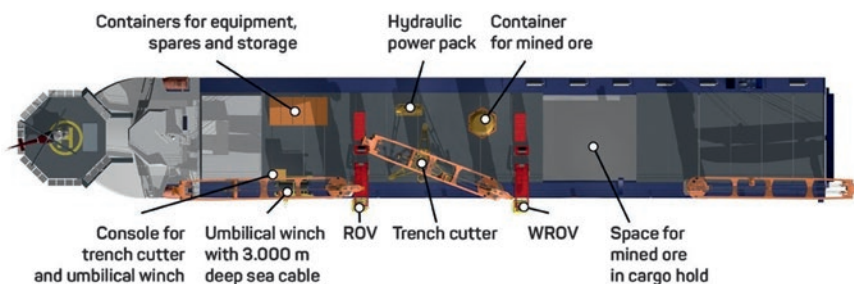


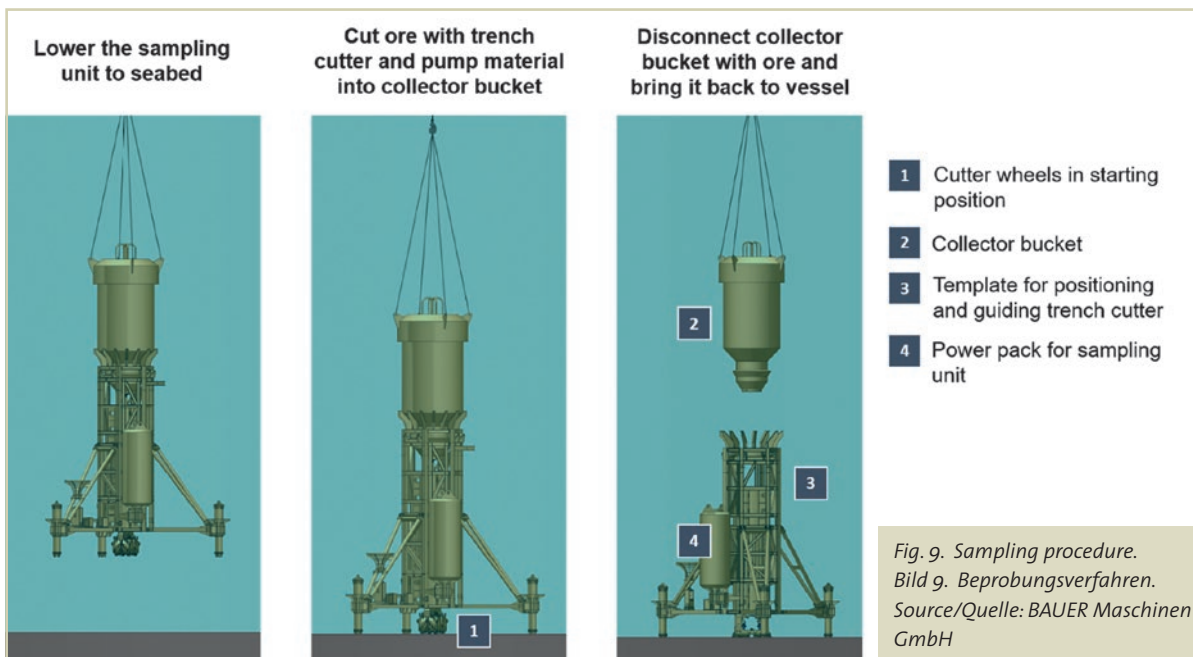
Fig. 7. Exemplary setup of mining equipment on deck. // Bild 7. Beispielhafter Aufbau des Abbaugeräts an Deck. Source/Quelle: BAUER Maschinen GmbH

Innerhalb des Eimers wird das Erz vom Prozesswasser getrennt. Der Erzcontainer sitzt oben auf der Schablone auf. Zweck der mit drei Stützfüßen ausgestatteten Schablone ist es, die Schlitzwandfräse zu führen und auf unebenem Terrain ebenmäßig auszurichten. Zusätzlich trägt sie das Antriebsaggregat zur Energieversorgung der Fräseoperation.

Die Schlitzwandfräse hat eine Grundfläche von 1.500 mm auf 3.200 mm bei einem Gewicht von bis zu 150 t. Die aktuelle Frästiefe liegt bei 8 m. Durch einen Fräsvorgang können somit etwa 38 m³ Erz ausgehoben werden. Der Saugkasten zwischen den Fräserädern sorgt dafür, dass nur Material mit max. 75 mm Korndurchmesser in die Pumpe und damit in den Erzcontainer gelangt.

3.3 Verfahren zur Beprobung und Produktionsleistung des Vertical Approach

Das Verfahren zur Beprobung ist diskontinuierlich. Komponenten sind die Schlitzwandfräse, die Schablone der Schlitzwandfräse, das Antriebsaggregat für die Abbaueinheit und der Erzcontainer. Das System wird an Bord des Abbauschiiffs zusammengesetzt und mithilfe einer Schiffswinde und einem Kran bis auf den Meeresboden abgesenkt (Bild 9). Die Energieversorgung der Einheit wird über das Versorgungskabel gewähr-



Within the bucket, the ore is separated from the process water. The collector bucket sits on top of the template with three stabilizing legs. The purpose of the template is to guide and level the trench cutter in uneven terrain and to hold the power pack for energy supply of the cutting operation.

The trench cutter has a footprint of 1,500 mm by 3,200 mm and a weight of up to 150 t. The current cutting depth is 8 m. Therefore, one cut will extract approximately 38 m³ of ore. The suction box between the cutter wheels only allows material with max. 75 mm particle size to enter the pump and consequently the collector bucket.

3.3 Vertical Approach sampling procedure and production rate

The sampling procedure is discontinuous. The components consist of the trench cutter, the template for the trench cutter, the power pack for the mining unit, and the collector bucket. The system will be assembled on the deck of the mining vessel and then lowered to the seabed with the help of a vessel winch and crane (Figure 9). The power supply for the unit is provided via umbilical cable that extends from the vessel to the sampling unit. The template with its stabilizing legs guarantees an exact and level positioning of the trench cutter, even in rough terrain.

Once the sampling unit is in position, the trench cutter starts turning its wheels and loosening the ore material under the cutter wheels. The heavy weight of the trench cutter generates the necessary contact pressure for the cutter teeth. In combination with the rotation of the cutter wheels, the ore is cut into chips.

A protection collar around the cutter wheels (cutter wheels see Figure 9, protection collar not shown) prevents fine sediments from forming plumes in the seawater. All cutting chips are conveyed towards the suction inlet of the cutter pump and all particles smaller than 75 mm are pumped into the collector bucket. Within the ore collector bucket, an integrated separation unit separates solids from sea water. The ore cuttings settle in the bucket, whereas the sea water will be pumped back to

leistet, das die Sampling-Einheit mit dem Schiff verbindet. Die Schablone mit Stützfüßen gewährleistet die exakte und ebene Positionierung der Schlitzwandfräse auch auf unebenem Gelände.

Sobald die Sampling-Einheit positioniert ist, beginnen die Fräsräder zu rotieren und so das darunterliegende erzhaltige Material aufzulockern. Das hohe Eigengewicht der Schlitzwandfräse sorgt für den notwendigen Auflagedruck für die Fräszähne. In Kombination mit der Rotation der Fräsräder wird das Erz abgeholt.

Ein Schutzkragen rund um die Fräsräder (Fräsräder siehe Bild 9, Schutzkragen nicht abgebildet) verhindert, dass feine Sedimente im Meerwasser aufgewirbelt werden. Das gefräste Massivsulfid wird durch den Saugkasten zur Pumpe der Fräse befördert. Partikel mit weniger als 75 mm Durchmesser werden in den Erzcontainer gepumpt. Innerhalb des Containers trennt eine integrierte Separationseinheit Feststoffe vom Meerwasser. Das Fräsgut sedimentiert im Container, während das Prozesswasser zurück zur Schlitzwandfräse gepumpt wird, wo es als Transportmedium für das Fräsgut wiederverwendet wird.

Außer der Entwicklung des Erstkonzepts der oben beschriebenen umweltfreundlichen Technologie zur Beprobung besteht ein entscheidender Faktor für die Bemessung der Schlitzwandfräseinheit darin, den benötigten Energiebedarf zum Fräsen für die gewünschte Produktionsrate einzuschätzen. Erste Nachforschungen zum Energiebedarf für das Fräsen des erzhaltigen Materials in Abhängigkeit der geomechanischen Eigenschaften des Erzes und des hydrostatischen Drucks der Wassersäule bei Tiefseeinsätzen wurden bereits durchgeführt.

Mithilfe des Delft Cutting Model (6) wurde die benötigte Fräsenergie zum Lösen von Massivsulfiden unter hohem Wasserdruck abgeschätzt. Die benötigte Fräsenergie erhöht sich mit steigendem Wasserdruck, da sich das Materialverhalten in Umgebungen mit hohem Druck von spröde zu duktil ändert. Um die theoretischen Berechnungen zu validieren, bewerteten Spagnoli et al. (7) 14 verschiedene Schlitzwandfräsprojekte (an

the trench cutter, where it is re-used as transport medium for the cuttings.

Besides developing a first concept for an environmentally friendly sampling procedure as described above, a crucial factor for dimensioning the trench cutter unit is estimating the energy needed for cutting for a required production rate. First research efforts have already been made to find out more about the energy required for cutting the ore material, depending on the geomechanical properties of the ore and the hydrostatic pressure of the water column for deep-sea applications.

With the help of the Delft cutting model (6) the cutting energy needed for excavating rock deposits under high water pressures was estimated. The required cutting force increases with the water pressure because the material behaviour in a high pressure environment changes from brittle to ductile. In order to validate the theoretical calculation, 14 different trench cutter projects (on shore) have been assessed by Spagnoli et al. (7) and the estimated energy calculated with the Delft cutting model was compared to the actual energy required. The calculated theoretical energy was 2.9 times higher than the measured energy. As the Delft cutting model has not been validated with data from trench cutters under hyperbaric conditions, the factor 2.9 was also applied for estimating the cutting energy under hyperbaric conditions. Depending on the geomechanical properties of the rock the energy required for cutting rock in a water depth of 2,000 m is about two to four times higher than the energy required for cutting the same material under atmospheric conditions.

4 Sustainability of the Vertical Approach

In comparison to the conventional massive sulfide mining concepts, the Vertical Approach sampling method offers advantages especially when it comes to the ecological footprint.

4.1 Ecological footprint

Deep-sea sampling, of course, has an impact on the sensitive ecosystem of the deep sea. With the Vertical Approach concept, maximum effort will be put in to minimize the ecological footprint of the mining procedure.

A big concern regarding deep-sea mining is the formation of sediment plumes and the impact on the sensitive species living in the deep sea (8). To prevent fine material from escaping from the cutting zone and creating plumes, a protection collar will be placed around the cutter wheels; thus, all the fine material resulting from the cutting process stays within this zone, while the water, mixed with fine sediments and cuttings, will be pumped into the collector bucket.

Within the collector bucket, a separation process takes place in which the coarse particles separate from the sea water in a sedimentation process and settle down at the bottom of the collector bucket. The excess water overflows through a lamella thickener, where the fine particles can settle down and most of the turbidity will be removed. The treated water is returned to the cutter wheels, where it will be re-used in the cutting circuit. This closed system minimizes the volume of deep-sea water impacted by the cutting process.

The sampling procedure is very selective. The template and the trench cutter are lowered with a winch and not moved hori-

Land durchgeführt) und verglichen dabei die Energieberechnungen nach dem Delft-Cutting Model mit dem tatsächlichen Energiebedarf. Der theoretisch errechnete Energiebedarf lag dabei um den Faktor 2,9 höher als der gemessene Energiebedarf. Da das Delft Cutting Model noch nicht anhand von Daten von Schlitzwandfräsen unter Überdruckbedingungen validiert wurde, kam zur Abschätzung der Fräsenergie unter Überdruckbedingungen ebenfalls der Faktor 2,9 zur Anwendung. In Abhängigkeit der geomechanischen Eigenschaften des Untergrunds ist der Energiebedarf zum Fräsen von Fels in einer Wassertiefe von 2.000 m zwei- bis vierfach höher als der Energiebedarf zum Fräsen desselben Materials unter normalen atmosphärischen Bedingungen.

4 Nachhaltigkeit des Vertical Approach

Im Vergleich mit konventionellen Konzepten zum Abbau von Massivsulfiden bietet der Vertical Approach als Verfahren zur Probenahme insbesondere im Hinblick auf den ökologischen Fußabdruck Vorteile.

4.1 Ökologischer Fußabdruck

Die Probenahme in der Tiefsee hat unbestreitbar Auswirkungen auf das empfindliche Ökosystem der Tiefsee. Beim Vertical Approach wird maximaler Aufwand betrieben, um den ökologischen Fußabdruck der Bergbauarbeiten auf ein Minimum zu reduzieren.

Große Bedenken gegenüber dem Tiefseebergbau bestehen wegen des Aufwirbelns von Sedimenten und dessen Auswirkungen auf die empfindlichen Spezies der Tiefsee (8). Um das Austreten von Feinmaterial aus dem Fräsbereich zu verhindern, wird ein Schutzkragen rund um die Fräsräder platziert. Somit verbleibt das feine Material aus dem Fräsvorgang innerhalb dieser Zone, während das Wasser, vermischt mit feinen Sedimenten und Fräspänen, in den Erzcontainer gepumpt wird.

Innerhalb des Erzcontainers findet der Separationsprozess statt, durch den die grobkörnigen Partikel in einem Sedimentationsprozess vom Meerwasser getrennt werden, indem sie sich am Boden des Sammeleimers absetzen. Das überschüssige Wasser läuft durch einen Lamellenabscheider, sodass sich die feinen Partikel absetzen können, wodurch der Großteil der Trübung geklärt wird. Das so behandelte Wasser wird zu den Fräsrädern zurückgeführt und wieder im Fräskreislauf verwendet. Dieses geschlossene System minimiert das Volumen des Meerwassers, das durch den Fräsprozess beeinträchtigt wird.

Die Beprobung ist selektiv. Die Schablone und die Schlitzwandfräse werden über eine Seilwinde abgelassen, anstatt einmal platziert und dann horizontal entlang des Meeresbodens bewegt zu werden. Somit ist die Einflussosphäre auf die Grundfläche der Schablonenfüße und der Schlitzwandfräse beschränkt. Die erhaltenden und nicht erhaltenden Zonen können klar voneinander abgetrennt werden.

Ein weiterer Aspekt des Vertical Approach, der sich auf die Umwelteinflüsse dieser Methode im Vergleich mit anderen Verfahren auswirkt, ist, dass lediglich ein „Werkzeug“ zum Zweck der Materialentnahme mit dem Meeresboden in Berührung kommt. Der Boden muss nicht vorbereitet werden und es wird lediglich der Rohstoff mit minimalen Auswirkungen auf die Umgebung

zontally on the sea bottom once they are placed. The impact is limited to the footprint of the template legs and the trench cutter. Thus, a precise demarcation between ore bearing and non-ore bearing zones of the sea bottom can be made.

Another aspect of the Vertical Approach that manifests the smaller environmental impact of this method in comparison to others is that only one "tool" is required to come into contact with the seabed for the purpose of extracting the material. No preparation of the ground in advance is necessary and only the raw material is extracted, with minimal impact on the surrounding areas. It could be almost compared to an endoscopic surgery where minimal scars are left on the sea bottom.

4.2 Energy

The transport of the mined ore from the seabed to the vessel over approximately 2,500 vertical meters is a process with a high energy demand.

In conventional concepts, a riser system with a pump is used to lift the material to the surface. The Vertical Approach sampling concept considers a discontinuous lifting process of the ore container to the vessel which requires less energy in comparison to a riser system.

4.3 Noise emission

The goal of the Vertical Approach method is to minimize the sources of noise in the deep-sea environment to a minimum and reduce the noise level of the sources.

In comparison to conventional methods, the Vertical Approach concept already has a small number of sources of noise. The power pack and distributor attached to the template (Figure 8) is electrically powered from the vessel via umbilical cable. The electrical energy is distributed to the cutter pump and gearboxes via frequency converter, only a minor percentage will be converted to hydraulic power. The other noise resulting from cutting the ore with the cutter wheels and pumping the ore into the container will occur mostly when the cutter wheels and the pump are lowered into the ground, and thus the surrounding ground acts as an insulating barrier and a natural noise cancellation. Thanks to the discontinuous ore transport system, no noise is generated by a riser system from pumps or rising material within the pipes to the vessel.

The noise level of the sources cannot be quantified at this point, but from experience with other underwater drilling methods with comparable noise emissions – drilling foundations for offshore turbines – where noise emission measurements were carried out, the method was characterized as a low-noise foundation type (9).

The nature of the sound emitted by all sources is non-impulsive, which is an advantage because studies show that mammals show a higher sensitivity to impulsive sound (when it comes to hearing damage) and, as a consequence, the sound exposure levels for impulsive sound are set lower than for non-impulsive sound (10).

5 Opportunities and outlook

The original intention for developing the Vertical Approach method was to use it for test mining in order to obtain a mining li-

entnommen. Man könnte das Verfahren beinahe mit einer endoskopischen Operation vergleichen, die nur minimale Narben auf dem Meeresboden hinterlässt.

4.2 Energie

Der Transport des abgebauten Erzes vom Meeresboden auf das Schiff über ungefähr 2.500 senkrechte Meter erfordert große Mengen Energie.

Konventionelle Ansätze verwenden ein energieintensives Riser-System, um das Material an die Oberfläche zu befördern. Der Vertical Approach zur Beprobung beinhaltet einen diskontinuierlichen Hebevorgang des Erzcontainers auf das Schiff, der im Vergleich mit einer Steigleitung weniger Energie verbraucht.

4.3 Lärmemissionen

Ziel des Vertical Approach ist es, Lärmquellen in der Tiefseeumgebung auf ein Minimum zu reduzieren und den Lärmpegel dieser Quellen zu senken.

Im Vergleich mit konventionellen Verfahren bindet der Vertical Approach vom Prinzip her bereits weniger Lärmquellen ein. Das Antriebs- und Stromverteileraggregat, das an der Schablone befestigt ist (Bild 8) wird vom Schiff über eine Versorgungsleitung mit Strom versorgt. Die elektrische Energie wird über einen Frequenzumrichter an die Fräspumpe und die Getriebe verteilt, nur ein kleiner Anteil wird in hydraulische Kraft umgewandelt. Weitere Lärmemissionen durch das Fräsen des Erzes durch die Fräsräder und das Pumpen des Erzes in den Container entstehen größtenteils dann, wenn die Fräsräder und die Pumpe in den Boden abgesenkt sind, sodass der umliegende Boden als isolierende Barriere und natürlicher Schalldämpfer agiert. Dank des diskontinuierlichen Transportsystems wird kein Lärm durch eine Steigleitung mit Pumpleistung sowie das Aufsteigen des Materials auf das Schiff erzeugt.

Der Lärmpegel der bestehenden Lärmquellen kann bisher nicht in Zahlen festgelegt werden. Ähnliche Unterwasserbohrverfahren mit vergleichbarer Lärmemission – Bohren von Gründungen für Offshore-Windkraftanlagen – wurden jedoch im Zuge von Lärmmessungen als geräuscharme Gründungen eingestuft (9).

Die Beschaffenheit des Lärms aus allen Quellen ist nichtimpulsiv, was vorteilhaft ist, da Studien zeigen, dass Säugetiere gegenüber impulsivem Lärm empfindlicher sind (in Bezug auf Schädigungen des Gehörs). Der Lärmexpositionspegel ist daher für impulsiven Lärm niedriger als für nichtimpulsiven Lärm angesetzt (10).

5 Chancen und Ausblick

Die ursprüngliche Absicht hinter der Entwicklung des Vertical Approach war der Einsatz im Testbergbau zur Erlangung eines Lizenzgebiets von der ISA. In den „Empfehlungen zur Anleitung von Auftragnehmern zur Bewertung der möglichen Umweltauswirkungen mariner Mineralexploration auf dem Gebiet“ (11) wird der Testbergbau als der Einsatz und Test eines voll integrierten und funktionstüchtigen Bergbausystems inklusive Sammelsystem und Wasserablaufsystem definiert. Diese Anforderungen werden durch das zuvor erläuterte Verfahren auf „belastungsarme“ Art und Weise erfüllt.

cense for a license area from the ISA. In “Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the Area” (11), test mining is defined as the use and testing of a fully integrated and functional mining system including collection systems and water discharge systems. All these requirements are fulfilled in a “low-impact” manner with the method illustrated above.

Besides using this method for test mining and exploration of SMS deposits, there is the potential for converting it to a mining method. Due to the relatively small dimensions of the unit and the ability to work independently without a huge fleet of auxiliary equipment, it could be used for mining the cone-shaped SMS deposits or other small high-grade ore deposits in the deep sea.

For obtaining higher ore volume output for a profitable mining application, the system could be adapted in different ways. The cutter footprint, e. g., could be extended; more than one container could be used for collecting and transporting the ore, so that the trench cutter could work constantly without any downtime. First concept studies already exist but have to be refined when the demands of a potential application for mining are to be defined.

In order to promote the Vertical Approach method and to assist potential investors with obtaining mining licenses for their license areas in the future, BAUER Maschinen GmbH and Harren & Partner have started a cooperation. The two companies intend to combine their expertise, network and experience for offering the full package necessary for the pilot mining test, from risk assessment to operations planning and delivery of the required equipment, with a focus on minimizing the impact on the environment while achieving maximum value.

Über die Verwendung im Testbergbau und zur Erkundung von Massivsulfidvorkommen hinaus besteht Potential zur Umwandlung in ein Bergbauverfahren. Aufgrund der relativ kleinen Ausmaße der Sampling-Einheit und der Möglichkeit zum unabhängigen Einsatz ohne eine große Schiffsflotte mit Hilfsgerät, bietet sich das Verfahren zum Abbau kegelförmiger mariner Massivsulfide oder anderer kleiner Erzlagerstätten mit hohem Erzgehalt in der Tiefsee an.

Um eine höhere Erzproduktionsmenge für eine profitable Bergbauunternehmung zu erreichen, könnte das System auf verschiedene Arten angepasst werden. Beispielsweise könnte der Fräsdurchmesser erhöht werden oder mehr als ein Container zur Sammlung und zum Transport des Erzes zum Einsatz kommen, sodass die Schlitzwandfräse kontinuierlich ohne Stillstandszeiten eingesetzt werden könnte. Erste Konzeptstudien liegen bereits vor, müssen jedoch noch hinsichtlich der Anforderungen eines möglichen Einsatzes im Bergbau genauer überarbeitet werden, sobald diese vorliegen.

Um die Methode des Vertical Approach voranzutreiben und potentiellen Investoren bei der Erlangung von Bergbaulizenzen für zukünftige Lizenzgebiete zur Seite zu stehen, haben die BAUER Maschinen GmbH und Harren & Partner eine Kooperative ins Leben gerufen. Beide Unternehmen möchten ihre Expertise, Netzwerke und Erfahrung kombinieren, um das Komplettpaket anbieten zu können, das für den Piloteinsatz – von der Risikobewertung bis zur Betriebsplanung und Lieferung des benötigten Geräts – notwendig ist, wobei der Fokus auf der Minimierung der Umwelteinflüsse bei maximalem Wert liegt.

References / Quellenverzeichnis

- (1) <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/the-discovery-of-hydrothermal-vents/>
- (2) <https://www.whoi.edu/feature/history-hydrothermal-vents/discovery/1979-2.html>
- (3) <http://www.geol-amu.org/notes/be2c-3-6.htm>
- (4) International Seabed Authority ISBA/25/LTC/6/Rev.1: Review of the recommendations for the guidance of contractors for the assessment of possible minerals in the Area. Sitzung der Legal and Technical Commission, Teil I, Kingston, 4.–15. März 2019, überarbeitet am 30. März 2020: Abs. 66, S. 32.
- (5) International Seabed Authority ISBA/25/LTC/6/Rev.1: Review of the recommendations for the guidance of contractors for the assessment of possible minerals in the Area. Sitzung der Legal and Technical Commission, Teil I, Kingston, 4.–15. März 2019, überarbeitet am 30. März 2020: Abs. 7, S. 3.
- (6) Miedema, S. A. (2014): The Delft Sand, Clay and Rock Cutting Model.
- (7) Spagnoli, G. et al. (2016): A Novel Mining Approach for Seafloor Massive Sulfide Deposits.
- (8) Spearman J. et al.(2020): Measurement and modelling of deep-sea sediment plumes and implications for deep-sea mining. In: Scientific Reports, nature research.
- (9) Koschinski, S; Lüdemann, K. (2019): Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz, Insel Vilm, Deutschland.
- (10) Hastie, G. et al. (2019): Effects of impulsive noise on marine mammals: investigating range-dependent risk. In: Ecological Applications, April 2019.
- (11) International Seabed Authority ISBA/25/LTC/6/Rev.1: Review of the recommendations for the guidance of contractors for the assessment of possible minerals in the Area. Sitzung der Legal and Technical Commission, Teil I, Kingston, 4.–15. März 2019, überarbeitet am 30. März 2020: S. 39.

Authors / Autoren

Dipl.-Ozeanograph Johannes Post, DeepSea Mining Alliance e. V., Hamburg/Germany, Dipl.-Ing. Verena Schreiner and Dipl.-Ing. (FH) Leonhard Weixler, BAUER Maschinen GmbH, Schrobenhausen/Germany