

Slurry Transport System of the ROBOMINERS Prototype

The increasing need of raw materials necessitates the exploitation of new deposits, potentially leading to (very) deep underground mines. With the help of fully automated machines and/or autonomous robots it is aimed to open difficult to access deposits or re-open abandoned mines. In the past four years, the consortium of the European-wide H2020 Resilient Bio-inspired Modular Robotic Miners (ROBOMINERS) project has conducted initial baseline studies of future robotic mining machines operating in such scenarios. Technologies have been investigated, which can be applied for underground exploration and selective mining, submerged and/or operating in slurries. Throughout this project a low TRL prototype has been developed and tested, which is fully water-hydraulically powered. The prototype comprises an unconventional locomotion system, various sensors for navigation and perception, a production tool to excavate (small) amounts of soft rock material and an ore transport and -analysis system. After

a multi-stage design process, a sophisticated hydraulic slurry transport system has been developed using 3D printing technology for rapid prototyping and the manufacturing of functional parts. Taking advantage of the Venturi effect, the conveying system facilitates the ore transport from the rock face to the rear of the robot and the subsequent inline analysis by means of Laser Induced Breakdown Spectrum (LIBS) technology. The testing of the full-scale prototype has been executed in an open-cast oilshale mine under (partly) submerged conditions. During the field tests, the working principle of the Venturi ore transport system could be proven by successful transport of excavated oil shale up to a certain grain size. The project will serve as a guideline for future mining robots, including feasibility studies of different robot designs, potential mine layouts and mining scenarios as well as various excavation tools for different rock conditions and geophysical instruments.

Fördersystem des ROBOMINERS-Prototyps

Die steigende Nachfrage nach Rohstoffen macht es notwendig, neue Lagerstätten zu erschließen, was zu (sehr) tiefen Untertagebergwerken führen kann. Mit Hilfe von vollautomatischen Maschinen bzw. autonomen Robotern sollen schwer zugängliche Lagerstätten erschlossen oder stillgelegte Bergwerke wiedereröffnet werden. Das Konsortium des europaweiten Projekts H2020 Resilient Bio-inspired Modular Robotic Miners (ROBOMINERS) hat in den letzten vier Jahren erste Grundlagenstudien zu zukünftigen robotergestützten Bergbaumaschinen in solchen Szenarien durchgeführt. Es wurden Technologien untersucht, die für die untertägige Erkundung und den selektiven Abbau unter Wasser und/oder in Schlämmen eingesetzt werden können. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Prototyp mit niedrigem TRL-Level entwickelt und getestet, der ausschließlich durch Wasserhydraulik

angetrieben wird. Der Prototyp umfasst ein unkonventionelles Fortbewegungssystem, verschiedene Sensoren für Navigation und Wahrnehmung, ein Werkzeug für den Abbau von (kleinen) Mengen an Weichgestein und ein System für den Transport und die Analyse des abgebauten Erzes. Nach einem mehrstufigen Entwurfsprozess wurde ein ausgeklügeltes hydraulisches Slurry-Transportsystem entwickelt, das mithilfe der 3D-Drucktechnologie für das Rapid Prototyping und die Herstellung von Funktionsteilen entwickelt wurde. Das Fördersystem nutzt den Venturi-Effekt und erleichtert den Transport des Erzes von der Ortsbrust zur Rückseite des Roboters und die anschließende Inline-Analyse mit Hilfe der Laser Induced Breakdown Spectrum (LIBS)-Technologie. Die Erprobung des Prototyps in Originalgröße erfolgte in einem Ölschiefer-Tagebau.

1 ROBOMINERS – project overview

In the realm of underground mining, the challenging conditions and potential dangers arising from events like rock fall or bursts consistently pose inherent risks to on-site personnel. Consequently, there is an ongoing shift towards complete mechanization and subsequent automation of mining processes. Nevertheless, certain tasks prove resistant to automation, necessitating human presence in potentially perilous areas for underground maintenance. Presently, there is preliminary research and development focused on the development of robots anticipated to replace human labor

1 ROBOMINERS – Projektübersicht

Im Untertagebergbau stellen die schwierigen Bedingungen und die potentiellen Gefahren, die sich aus Ereignissen wie Stein-schlag oder Ausbrüchen ergeben, immer wieder ein Risiko für das Personal vor Ort dar. Daher geht der Trend hin zur vollständigen Mechanisierung und anschließenden Automatisierung der Bergbauprozesse. Bestimmte Aufgaben lassen sich jedoch nicht automatisieren, sodass für die Wartung unter Tage die Anwesenheit von Menschen in potentiell gefährlichen Bereichen erforderlich ist. Gegenwärtig gibt es erste Forschungs- und Ent-

in underground mining within the next three decades. Future challenges in the mining industry, influenced by considerations of sustainability and ecological impact, demand additional dedication to research and development. Through the integration of fully automated machines or autonomous robots, the possibility of opening new deposits or economically operating previously closed mines becomes feasible. Potential roles for robots in mining encompass machine maintenance, exploration of abandoned mines and mining activities, particularly in difficult-to-access areas. The design of autonomous robots may vary significantly based on factors such as mine layout, mining method and deposit type, deviating from the structure of current machines. (1, 2)

The concept driving the ROBOMINERS project is the exploration of innovative technologies for accessing challenging, untapped deposits. In this four-year initiative, 14 institutions across eleven EU countries collaborated to establish critical knowledge about future technologies employed in robot-operated mining scenarios. The goal was to develop and test a first-generation prototype of a small-scale mining robot. It is crucial to note that while this project and the resultant small-scale mining robot are intended for feasibility studies exploring various technologies for scenarios requiring excavation of small volumes, they are not intended to replace conventional mining and tunnelling equipment. Instead, the outcomes of the project aim to provide an overview of technologies that can be incorporated into future mining robots. (3, 4)

2 ROBOMINERS RM1 prototype

The largest of the several ROBOMINERS prototypes (RM1) is a full-scale robot, equipped with perception tools, an excavation tool and a material transport system. The key functionalities have been tested in summer 2023 in an Estonian open-pit oilshale mine. Further testing of the perception equipment has been performed in an underground mine in Slovenia. The prototype is fully water-hydraulically powered with a total power of 30 kW and an approximate weight of 1,350 kg, tethered, remote-controlled and with an overall length of approximately 4,500 mm. In the next section, the core modules of the RM1 prototype are presented.

2.1 Design overview

The body module comprises a structural hull and associated subsystems, including actuators responsible for the movement of the screw units. The diameter of the robot, exclusive of screws, measures 800 mm (expanding to 1,000 mm with screws extended). (5, 6)

For enhanced traction capabilities, the prototype will incorporate two main modules. This additional weight is essential to counterbalance the forces exerted by the production tool during excavation operations. Moreover, this modification facilitates a more comprehensive examination of the modular structure, its functionality and capabilities within an authentic operational setting. Both the first and second modules share identical dimensions and feature the same main component design, although their structural designs differ. The primary distinction lies in the fact that the second module is equipped with only two screw units. This alteration introduces additional free volume, creating more space for system components. Figure 1 illustrates the final design of the RM1 prototype. (7)

wicklungsarbeiten, die sich auf die Entwicklung von Robotern konzentrieren, die in den nächsten drei Jahrzehnten die menschliche Arbeitskraft im Untertagebergbau ersetzen sollen. Künftige Herausforderungen in der Bergbauindustrie, die von Überlegungen zur Nachhaltigkeit und zu ökologischen Auswirkungen beeinflusst werden, erfordern zusätzliches Engagement in Forschung und Entwicklung. Durch die Integration von vollautomatischen Maschinen oder autonomen Robotern wird die Möglichkeit geschaffen, neue Lagerstätten zu erschließen oder bereits stillgelegte Bergwerke wieder zu öffnen und wirtschaftlich zu betreiben. Mögliche Aufgaben von Robotern im Bergbau sind die Wartung von Maschinen, die Erkundung stillgelegter Bergwerke und die Durchführung von Bergbauarbeiten, insbesondere in schwer zugänglichen Gebieten. Das Design von autonomen Robotern kann aufgrund von Faktoren wie Bergwerkslayout, Abbaumethode und Lagerstättentyp erheblich variieren und von der Struktur der derzeitigen Maschinen abweichen. (1, 2)

Das Konzept des Resilient Bio-inspired Modular Robotic Miners (ROBOMINERS)-Projekts ist die Erforschung innovativer Technologien für den Zugang zu schwierigen, unerschlossenen Lagerstätten. In dieser vierjährigen Initiative arbeiteten 14 Institutionen aus elf EU-Ländern zusammen, um Wissen über künftige Technologien für robotergestützte Bergbauszenarien aufzubauen. Ziel waren die Entwicklung und Erprobung eines Prototyps der ersten Generation eines Bergbauroboters im kleinen Maßstab. Es ist wichtig zu betonen, dass dieses Projekt und der daraus resultierende Kleinbergbauroboter zwar für Machbarkeitsstudien zur Erforschung verschiedener Technologien für Szenarien gedacht sind, die den Abbau kleiner Mengen erfordern, aber nicht als Ersatz für konventionelle Berg- und Tunnelbauausrüstungen. Vielmehr sollen die Ergebnisse des Projekts einen Überblick über Technologien geben, die in zukünftige Bergbauroboter integriert werden können. (3, 4)

2 ROBOMINERS RM1-Prototyp

Der größte der verschiedenen ROBOMINERS-Prototypen (RM1) ist ein vollwertiger Roboter, der mit Wahrnehmungswerkzeugen, einem Abbaugerät und einem Materialtransportsystem ausgestattet ist. Die wichtigsten Funktionalitäten wurden im Sommer 2023 in einem estnischen Ölschiefer-Tagebau getestet. Weitere Tests der Wahrnehmungsausrüstung wurden in einem Bergwerk unter Tage in Slowenien durchgeführt. Der Prototyp ist vollständig wasserhydraulisch angetrieben, hat eine Gesamtleistung von 30 kW und ein Gewicht von etwa 1.350 kg, ist kabelgebunden, ferngesteuert und hat eine Gesamtlänge von etwa 4.500 mm. Im nächsten Abschnitt werden die Module des RM1-Prototyps vorgestellt.

2.1 Design

Das Hauptmodul besteht aus einem strukturellen Rumpf und den dazugehörigen Untersystemen, einschließlich der Aktuatoren, die für die Bewegung der Schraubenräder verantwortlich sind. Der Durchmesser des Roboters (ohne Schrauben) beträgt 800 mm (mit ausgefahrenen Schrauben 1.000 mm). (5, 6)

Um die Traktion zu erhöhen, wird der Prototyp zwei Module enthalten. Dieses zusätzliche Gewicht ist notwendig, um die Kräfte aufzunehmen, die das Abbauwerkzeug beim Schneidprozess hervorruft. Darüber hinaus ermöglicht diese Änderung eine umfassenden

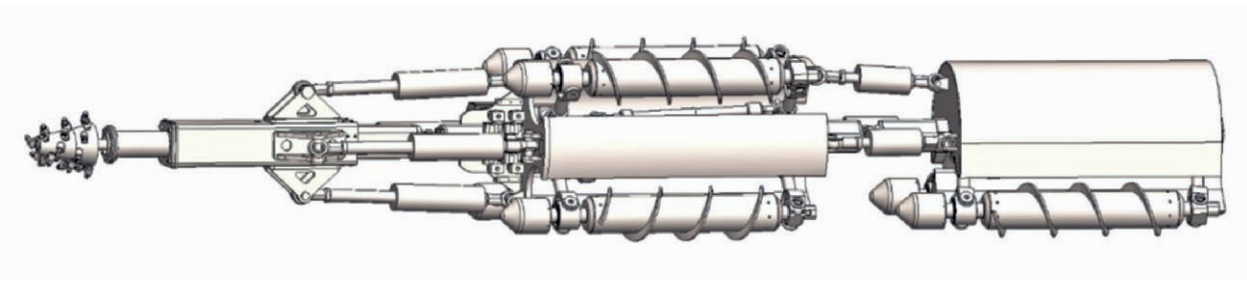


Fig. 1. Concept of Robominer prototype (RM1) (7). // Bild 1. Konzept des ROBOMINERS-Prototyps (RM1) (7).

2.2 Locomotion system

The locomotion system of the ROBOMINERS comprises a drive screw and a leg, which functions as a movable auxiliary structure situated between the screw and the main hull. The screw mechanism is rooted in the Archimedes screw principle, where the installed units are powered by water-hydraulic motors, and the leg's movement is driven by a water-hydraulic actuator. The incorporation of two independently driven screws allows for exceptionally small turning radii.

The actuation design principle remains consistent across all modules within the ROBOMINERS prototype. A water-hydraulic system with an open circuit is employed to power the actuators. Opting for water as the pressure medium presents notable advantages over oil, including high availability, low cost, environmental friendliness and non-flammability. However, as water serves as the hydraulic medium, considerations must be made for potential challenges such as corrosion, low lubrication properties and an elevated risk of leakage between moving parts in the design of the actuation system. The screw units, four of which are attached to Module 1 and two to Module 2, include the screw (1) housing the water-hydraulic screw drive unit, leg radial actuators (2) and leg side actuators (3). Figure 2 provides a visualization of the structure of the screw unit. (7)

2.3 Production tool

The part-face cutting technology was selected for various reasons, including its capability for continuous rock mining, adaptability to changing rock conditions, the robust nature of the mining tool and its universal applicability in both dry and submerged conditions. However, it is essential to acknowledge the drawbacks associated with this technology. The efficiency of mechanical cut-

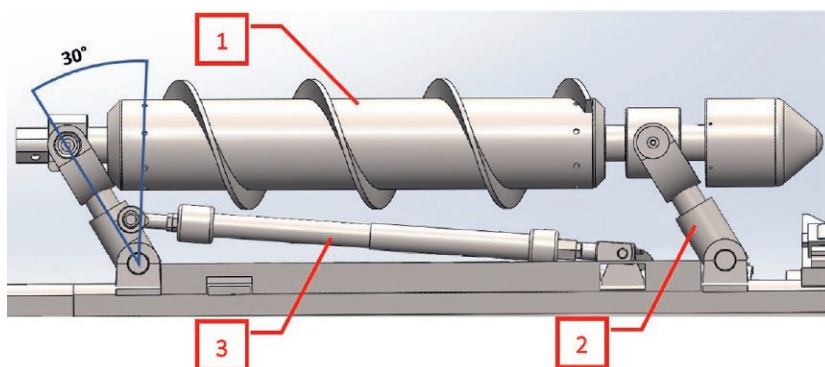


Fig. 2. Concept of Robominer screw unit (7). // Bild 2. Konzept des Schneckenantriebs (7).

tere Untersuchung des modularen Aufbaus, seiner Funktionalität und seiner Fähigkeiten in einer realen Betriebssituation. Das erste und das zweite Modul haben identische Abmessungen und sind in ihren Hauptkomponenten gleich aufgebaut, unterscheiden sich jedoch in ihrer strukturellen Gestaltung. Der Hauptunterschied liegt darin, dass das zweite Modul mit nur zwei Schraubenrädern ausgestattet ist. Dadurch entsteht ein zusätzliches freies Volumen, das mehr Platz für Systemkomponenten schafft. Bild 1 zeigt das endgültige Design des RM1-Prototyps. (7)

2.2 Fortbewegungssystem

Das Fortbewegungssystem des ROBOMINERS besteht aus einer Antriebsschraube und einem Bein, das als bewegliche Hilfskonstruktion zwischen dem Schraubenrad und dem Haupttrumpf fungiert. Der Schneckenmechanismus beruht auf dem Prinzip der archimedischen Schraube, wobei die installierten Einheiten durch wasserhydraulische Motoren angetrieben werden und die Bewegung des Beins durch einen wasserhydraulischen Aktuator erfolgt. Durch den Einsatz von zwei unabhängig voneinander angetriebenen Schrauben sind außergewöhnlich kleine Kurvenradien möglich.

Das Konstruktionsprinzip des Antriebs bleibt bei allen Modulen des ROBOMINERS-Prototyps gleich. Für den Antrieb der Aktuatoren wird ein wasserhydraulisches System mit offenem Kreislauf verwendet. Die Verwendung von Wasser als Druckmedium bietet gegenüber Öl erhebliche Vorteile wie sehr gute Verfügbarkeit, geringe Kosten, Umweltfreundlichkeit und Nichtentflammbarkeit. Da Wasser jedoch als Hydraulikmedium dient, müssen bei der Konstruktion des Antriebssystems potentielle Probleme wie Korrosion, geringe Schmiereigenschaften und ein erhöhtes Risiko von Leckagen zwischen beweglichen Teilen berücksichtigt werden.

Die Schneckeneinheiten, von denen vier an Modul 1 und zwei an Modul 2 angebracht sind, umfassen die Schnecke (1), in der die wasserhydraulische Schneckenantriebseinheit untergebracht ist, radiale Aktuatoren (2) und seitliche Aktuatoren (3). Bild 2 veranschaulicht den Aufbau der Schneckeneinheit (7).

2.3 Abbauwerkzeug

Ein Teilschnittsystem wurde aus verschiedenen Gründen ausgewählt, u. a. wegen seiner Eignung für den kontinuierlichen Gesteinsabbau, seiner Anpassungsfähigkeit an wechselnde Gesteinsbedingungen, der Robustheit des Abbauwerkzeugs und seiner universellen Anwendbarkeit sowohl im

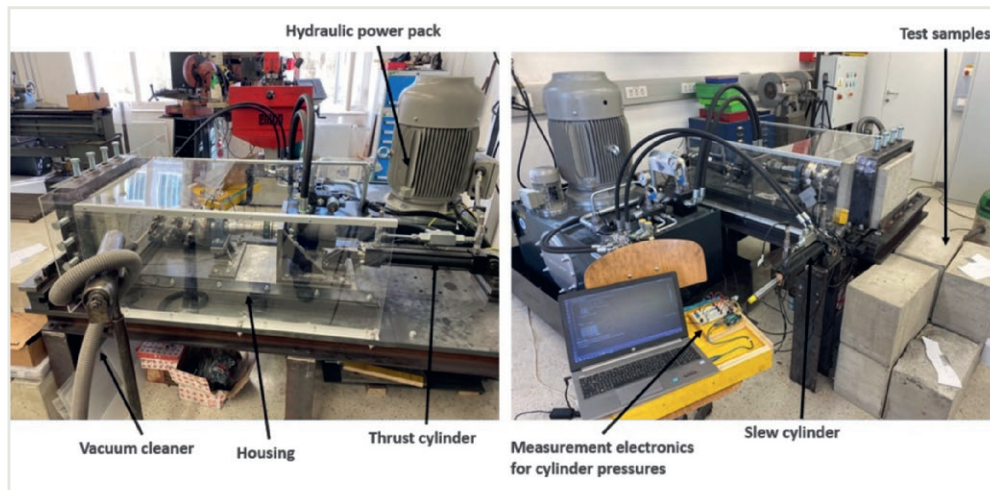


Fig. 3. Small-scale part-face cutter head test rig (9). // Bild 3. Prüfstand für kleinen Teilschnittschneidkopf (9).

ting systems is significantly influenced by the strength of the rock being excavated. High reaction forces are typically generated during the cutting process, necessitating absorption by the machine or robot. (8, 9)

Integral to the production tool's development is the evaluation of its excavation capabilities. Consequently, a production tool test rig (Figure 3) has been meticulously planned and constructed in the laboratory to systematically assess the performance of the production tool. To ensure the effectiveness of the test rig, the boundary conditions and power requirements of the part-face cutter head were initially defined. (9)

Various concrete specimens were created, including those with compressive strengths of 20 and 30 MPa UCS (Uniaxial Compressive Strength). Additionally, concrete specimens featuring oilshale (16 MPa UCS) and limestone (approximately 60 to 80 MPa UCS, not measured) inserts were fabricated. (9)

Key performance parameters were defined, including the excavation rate. In very soft rock, such as oil shale, the excavation rate reached approximately 1 m³/h. In stronger and more compact rocks, such as concrete with a UCS of 30 MPa, the excavation rate decreased to 0.2 m³/h, and the maximum UCS for this production tool was deemed to be 40 MPa. Beyond this limit, cutting operations are considered uneconomical. The scalability of part-face cutter heads is not a significant obstacle, but their capabilities diminish significantly at smaller scales. It has been demonstrated that, up to a certain rock strength, this method is applicable but not economically viable. In hard rock conditions, future challenges demand different approaches, such as alternative or combined excavation methods or the traditional drill and blast technique. (9)

2.4 Solid-state and mid-range perception sensors

In the context of the ROBOMINERS project, a novel approach was developed for autonomous measurements conducted by a robotic platform. In this test scenario, a robotic arm serves as an analogue to the prototypes' boom, where a sensing device can be mounted instead of the production tool. At the head of the robotic arm, a platform accommodating either a line of eight electrodes or a cluster of 32 electrodes (arranged in 8 x 4 lines) is used for linear

Trockenen als auch unter Wasser. Es ist jedoch wichtig, die mit dieser Technologie verbundenen Nachteile zu erwähnen. Die Effizienz mechanischer Schneidsysteme wird maßgeblich von der Festigkeit des zu schneidenden Gesteins beeinflusst. Während des Schneidvorgangs werden in der Regel hohe Reaktionskräfte erzeugt, die von der Maschine oder dem Roboter aufgenommen werden müssen. (8, 9)

Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung eines Abbawerkzeugs ist die Bewertung seiner Abbaurrate. Daher wurde ein Prüfstand (Bild 3) geplant und im Labor aufgebaut, um die Leistung des Schneidkopfes systematisch zu bewerten. Um die Effektivität des Prüfstands zu gewährleisten, wurden zunächst die Randbedingungen und der Leistungsbedarf des Teilschnittmesserkopfes festgelegt. (9)

Es wurden verschiedene Betonprobekörper hergestellt, darunter solche mit Druckfestigkeiten von 20 und 30 MPa UCS (Uniaxial Compressive Strength). Außerdem wurden Betonprobekörper mit Einlagen aus Ölschiefer (16 MPa UCS) und Kalkstein (ca. 60 bis 80 MPa UCS, nicht gemessen) hergestellt. (9)

Es wurden wichtige Leistungsparameter definiert, darunter die Abbaurrate. Bei sehr weichem Gestein wie Ölschiefer wurde eine Abbaurrate von etwa 1 m³/h erreicht. Bei festerem und kompakterem Gestein wie Beton mit einer Druckfestigkeit von 30 MPa sank die Abbaurrate auf 0,2 m³/h, und die maximale Druckfestigkeit für diesen Schneidkopf wurde mit 40 MPa angesetzt. Jenseits dieser Grenze wird das mechanische Schneiden in diesem Maßstab als unwirtschaftlich angesehen. Die Skalierbarkeit von Schneidköpfen ist kein wesentliches Hindernis, aber ihre Leistungsfähigkeit nimmt bei kleineren Maßstäben deutlich ab. Es hat sich gezeigt, dass diese Methode bis zu einer bestimmten Gesteinsfestigkeit zwar anwendbar, aber nicht wirtschaftlich ist. In hartem Gestein erfordern künftige Herausforderungen andere Ansätze, wie z. B. alternative oder kombinierte Abbaumethoden oder die traditionelle Bohr- und Sprengtechnik. (9)

2.4 Solid-state- und Mid-range-Wahrnehmungssensoren

Im Rahmen des Projekts wurde ein neuartiger Ansatz für autonome Messungen entwickelt, die von einer Roboterplattform durchgeführt werden. In diesem Testszenario dient ein Roboter-



Fig. 4. Robotic arm set up with graphite bearing electrodes (10).
Bild 4. Roboterarm mit Graphit-Elektrode (10).

or 2.5D Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Induced Polarization (IP) measurements. (10)

The experiments involved two types of electrodes. The first type featured a screw with a 3D-printed cone filled with a mixture of graphite and silicon. The second type employed spring-mounted pogo-pins with a layer of copper and silver at their ends (Figure 4). This latter electrode design was developed to adapt to and compensate for the subtle changes in the topography of the mine wall being mapped. (10)

2.5 Slurry transport system

2.5.1 Design criteria

The design criteria for the ROBOMINERS prototype ore transport system were derived from the RM1 prototype design status in early 2022. At that time, the layout of the RM1 prototype, including locomotion system and boom design, had all been established. Figure 5 presents the RM1 prototype design which formed the basis for the ore transport system design criteria. The main governing criterium followed the limitations on size and form factor. As can be seen from figure 5, a very limited space for an ore collection system near the production tool was available without impeding manoeuvrability of the boom and/or locomotion of RM1.

A second governing criterium was the capacity and the expected grain size of the excavated ore. With the design of the production tool established, the required capacity of the RM1 ore collection and transport system was limited to the cutting capacity of the tool. Laboratory testing of the tool established that up to 1 m³/h of intact ore rock per hour operation could be extracted. This testing further established

arm as Analogon zum Ausleger des Prototyps, an dem anstelle des Abbauwerkzeugs ein Messgerät angebracht werden kann. An der Spitze des Roboterarms befindet sich eine Plattform, auf der entweder eine Reihe von acht Elektroden oder ein Cluster von 32 Elektroden (in 8 x 4 Reihen angeordnet) für lineare oder 2,5D-Widerstandstomographie (ERT) und induzierte Polarisationsmessungen (IP) angebracht sind. (10)

Bei den Experimenten wurden zwei Arten von Elektroden verwendet. Der erste Typ bestand aus einer Schraube mit einem 3D-gedruckten Kegel, der mit einer Mischung aus Graphit und Silizium gefüllt war. Beim zweiten Typ wurden gefederte Stifte verwendet, deren Enden mit einer Schicht aus Kupfer und Silber versehen waren (Bild 4). Das letztgenannte Elektrodendesign wurde entwickelt, um sich an die feinen Veränderungen in der Topografie der zu kartierenden Ortsbrust anzupassen und diese zu kompensieren. (10)

2.5 Slurry-Transportsystem

2.5.1 Designkriterien

Die Konstruktionskriterien für das Fördersystem wurden vom Konstruktionsstand des RM1-Prototyps Anfang 2022 abgeleitet. Zu diesem Zeitpunkt waren das Layout des RM1-Prototyps einschließlich des Fortbewegungssystems und der Auslegerkonstruktion bereits festgelegt. Bild 5 zeigt das Design des RM1-Prototyps, das die Grundlage für die Designkriterien des Fördersystems bildete. Das wichtigste Kriterium waren die Beschränkungen hinsichtlich Größe und Beweglichkeit. Wie aus Bild 5 ersichtlich ist, stand nur ein sehr begrenzter Raum für ein Fördersystem in der Nähe des Produktionswerkzeugs zur Verfügung, ohne die Manövrierfähigkeit des Auslegers und/oder die Fortbewegung von RM1 zu beeinträchtigen.

Weitere entscheidende Kriterien waren die Kapazität und die erwartete Korngröße des abgebauten Erzes. Nachdem die Konstruktion des Abbauwerkzeugs festgelegt war, wurde die erforderliche Kapazität des RM1-Fördersystems auf die Abbaurrate des Werkzeugs beschränkt. Labortests des Werkzeugs ergaben, dass bis zu 1 m³ intaktes Erzgestein pro Betriebsstunde gewonnen werden kann. Bei diesen Tests wurde außerdem eine Korngrößenverteilung für das abgebaute Material mit einer D50 von ca. 2 mm und einer D90 von 10 mm ermittelt. Diese Werte wurden bei der Entwicklung des RM1-Fördersystems als Grundlage verwendet. Die

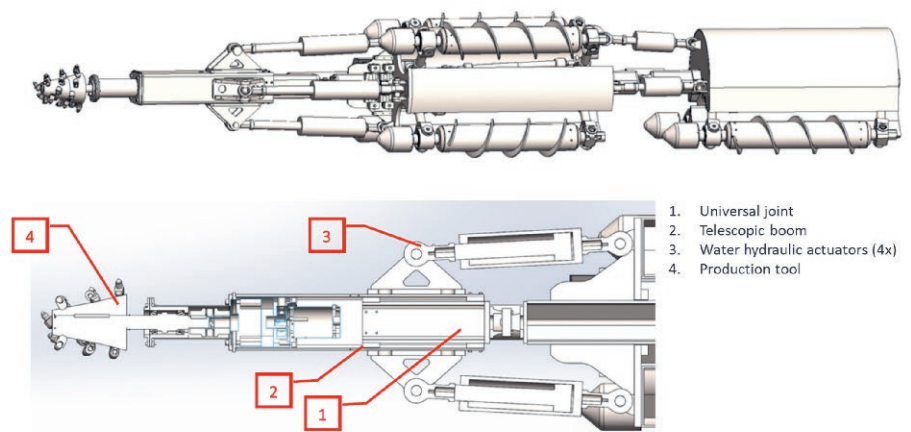


Fig. 5. RM1 prototype design status Q1-2022 – basis for ore transport system design criteria.
Bild 5. RM1-Prototyp Designstatus Q1-2022 – Basis für die Designkriterien des Transportsystems.
Source/Quelle: MU Leoben



Fig. 6. Examples of Venturi-based pumps, liquid-solid-slurry-eductors (www.foxvalve.com) (left), Sludge pump (www.nuovacontec.com) (middle) and venturi-sludge-extractor (www.ehle-hd.com) (right).
Bild 6. Beispiele von Venturi-basierten Pumpen, liquid-solid-slurry-eductors (www.foxvalve.com) (l.), Sludge pump (www.nuovacontec.com) (m.) und venturi-sludge-extractor (www.ehle-hd.com) (r.).

a grain size distribution for the excavated material with a D50 of approximately 2 mm and a D90 of 10 mm. These values were taken as a baseline for the RM1 ore transport system during development. Transport distance was determined by the expected RM1 demonstration layout and was set at 10 to 20 m between the prototype and the Laser-induced Breakdown-spectroscopy (LIBS) system.

Other design criteria were low technical complexity, to not further exacerbate the complexity of the prototype, and ease of installation and repair during the demonstration of RM1. As the time left in the ROBOMINERS project was limited, a form of rapid prototyping or application of off-the-shelf parts was necessary to achieve the project goals on time and within budget.

2.5.2 Concept development

Early technical concepts for an ore transport system suitable for the RM1 prototype were based on both mechanical and hydraulic ore collection and transport systems. Considering the design of RM1, an ore collection system was best positioned underneath the production tool for two reasons: space availability and chance of picking up material excavated by the production tool.

Further exploring industrial analogues; the Venturi-based pump was identified as a potential solution. A Venturi-based pump does not use moving parts and is driven by water. Venturi pumps can be designed and manufactured in a small and relatively flexible form factor. Examples of Venturi-based pumps are extractor pumps and powder mixers as shown in figure 6.

2.5.3 Venturi system development

Having established the basis of design for the RM1 ore collection and transport system, the development and manufacturing stage was initiated. With limited time available it was decided to use 3D printing technology for rapid prototyping of the Venturi pump, auxiliary parts and mounting brackets. Initially, the plan called for prototyping by 3D printing in plastics after which a final design could have been 3D printed in metal or produced by other manufacturing methods. During the rapid prototyping phase however a vast amount of experience was gained by the design team with 3D printing. The potential strength of the plastic parts that can be produced by 3D printing when carefully selecting printing parameters and controlling the printer environment was deemed sufficient to withstand the expected physical forces on the Venturi system dur-

Transportdistanz wurde durch das erwartete RM1-Demonstrationslayout bestimmt und auf 10 bis 20 m zwischen dem Prototyp und dem Laser-induced Breakdown-spectroscopy (LIBS)-System festgelegt.

Weitere Konstruktionskriterien waren eine geringe technische Komplexität, um die Komplexität des Prototyps nicht weiter zu erhöhen, und eine einfache Installation und Reparatur während der Demonstration des Roboters. Da die im Rahmen des ROBOMINERS-Projekts verbleibende Zeit begrenzt

war, war eine Form des Rapid Prototyping oder die Verwendung von Standardteilen erforderlich, um die Projektziele rechtzeitig und innerhalb des Budgets zu erreichen.

2.5.2 Konzeptentwicklung

Frühe technische Konzepte für ein Fördersystem, das für den RM1-Prototyp geeignet war, basierten sowohl auf mechanischen als auch auf hydraulischen Förder- und Transportsystemen. In Anbetracht der Konstruktion des Prototyps war ein Fördersystem aus zwei Gründen am besten unterhalb des Abbauwerkzeugs positioniert: Platzverfügbarkeit und Möglichkeit der Aufnahme von Material, das vom Abbauwerkzeug abgebaut wurde.

Bei der weiteren Untersuchung industrieller Analoga wurde die Venturi-Pumpe als mögliche Lösung identifiziert. Eine Venturi-Pumpe kommt ohne bewegliche Teile aus und wird durch Wasser angetrieben. Venturi-Pumpen können mit einem kleinen und relativ flexiblen Formfaktor entworfen und hergestellt werden. Beispiele für Venturi-Pumpen sind Extraktionspumpen und Pulvermischer, wie in Bild 6 dargestellt.

2.5.3 Entwicklungsprozess des Venturisystems

Nach der Festlegung der Konstruktionsgrundlage für das RM1-Förder- und Transportsystem wurde die Entwicklungs- und Fertigungsphase eingeleitet. Da nur wenig Zeit zur Verfügung stand, wurde beschlossen, die 3D-Drucktechnologie für das Rapid Prototyping der Venturipumpe, der Hilfsteile und der Montagehalterungen einzusetzen. Ursprünglich sah der Plan vor, die Prototypen durch 3D-Druck in Kunststoff zu erstellen. Danach hätte das endgültige Design in Metall gedruckt oder mit anderen Fertigungsmethoden hergestellt werden können. Während der Rapid-Prototyping-Phase sammelte das Konstruktionsteam jedoch eine Menge Erfahrung mit dem 3D-Druck. Die potentielle Festigkeit der Kunststoffteile, die bei sorgfältiger Auswahl der Druckparameter und Kontrolle der Druckerumgebung durch 3D-Druck hergestellt werden können, wurde als ausreichend erachtet, um den erwarteten physikalischen Kräften auf das Venturi-System während der geplanten Demonstration standzuhalten. Diese Annahme hat sich während der zweiwöchigen Erprobung des RM1-Prototyps unter realen Bedingungen in einem Tagebau in Estland im Sommer 2023 als richtig erwiesen.

Die Grundkonstruktion der entwickelten Venturi-Pumpe für den RM1-Prototyp basierte auf der Arbeit von Xu et al. (11), die in Bild 7 dargestellt ist.

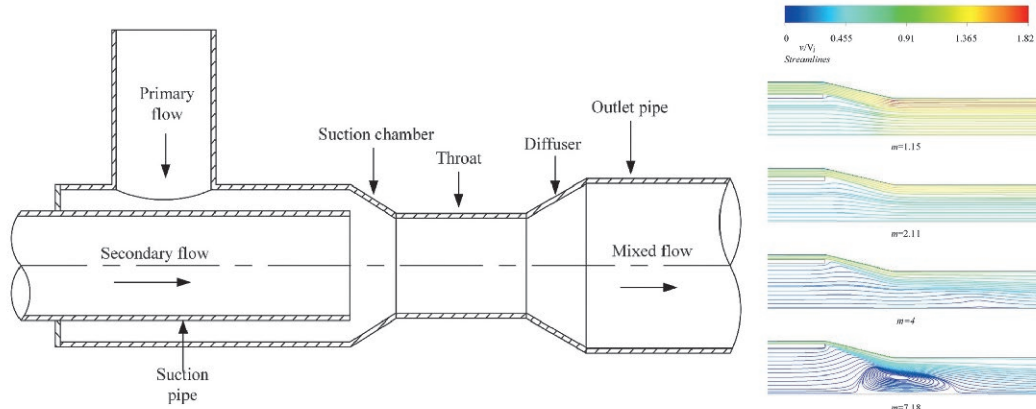


Fig. 7. Structural schematic drawing of annular jet pump (left) and streamlines from the suction chamber to the inlet of the throat for different values of m (11). // Bild 7. Schematische Zeichnung der Ringstrahlpumpe (l.) und Stromlinien vom Ansaugraum bis zum Eintritt in die Kehle für verschiedene Werte von m (11).

ing the planned demonstration. This assumption was proven correct during two weeks of testing in real-life conditions of the RM1 prototype in an opencast mine in Estonia in the summer of 2023.

The basic design of the developed Venturi pump for the RM1 prototype was based on the work by Xu et al. (11), which is shown in figure 7.

The annular jet pump (AJP) is in large parts defined by three parameters, namely the suction chamber angle α , diffuser angle β and a factor m for the ratio between the cross-sectional areas of the secondary and primary flows (11). Xu et al. (11) investigated the optimal value for m , i. e. achieving the highest efficiency, arriving at a value of 2,11 with $\alpha \approx 25^\circ$ and $\beta \approx 5^\circ$. Based on these parameters several designs of the RM1 AJP were prepared, as shown in figure 8, and subsequently tested for attainable vacuum at the suction inlet.

The performance of the early designs was tested using a multi-stage centrifugal pump with a $6 \text{ m}^3/\text{h}$ capacity at $\sim 6 \text{ bar}$ maximum pressure. It was found that the design parameter for m with values around 2 to 3 was not resulting in sufficient suction, i. e. vacuum at the secondary inlet at the given motive medium conditions (5 to $6 \text{ m}^3/\text{h}$ at 5 to 6 bar).

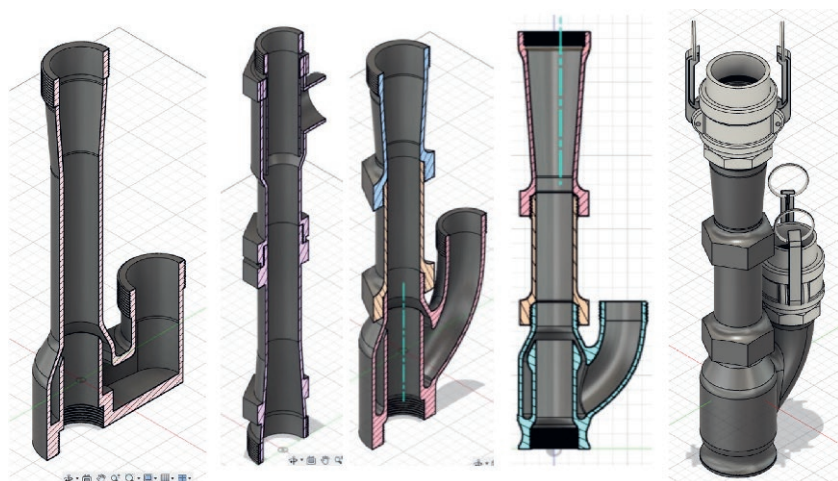


Fig. 8. Early designs for the RM1 prototype AJP by the ROBOMINERS design team. Bild 8. Frühe Entwürfe für den Prototyp der RSP durch das ROBOMINERS-Designteam. Source/Quelle: MU Leoben

Die Ringstrahlpumpe (RSP) wird größtenteils durch drei Parameter definiert, nämlich den Saugkammerwinkel α , den Diffusorwinkel β und einen Faktor m für das Verhältnis zwischen den Querschnittsflächen des Sekundär- und Primärstroms (11). Xu et al. untersuchten den optimalen Wert für m , d. h. das Erreichen des höchsten Wirkungsgrads, und kamen zu einem Wert von 2,11 mit $\alpha \approx 25^\circ$ und $\beta \approx 5^\circ$. Auf der Grundlage dieser Parameter wurden mehrere Entwürfe der RM1 RSP erstellt, wie in Bild 8 dargestellt, und anschließend auf das erreichbare Vakuum am Saugeinlass getestet.

Die Leistung der ersten Entwürfe wurde mit einer mehrstufigen Kreiselpumpe mit einer Förderleistung von $6 \text{ m}^3/\text{h}$ bei ungefähr 6 bar Maximaldruck getestet. Es stellte sich heraus, dass der Auslegungsparameter für m mit Werten um 2 bis 3 bei den gegebenen Bedingungen für das Antriebsmedium (5 bis $6 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 5 bis 6 bar) nicht zu einer ausreichenden Ansaugung, d. h. einem Vakuum am Sekundäreinlass, führte.

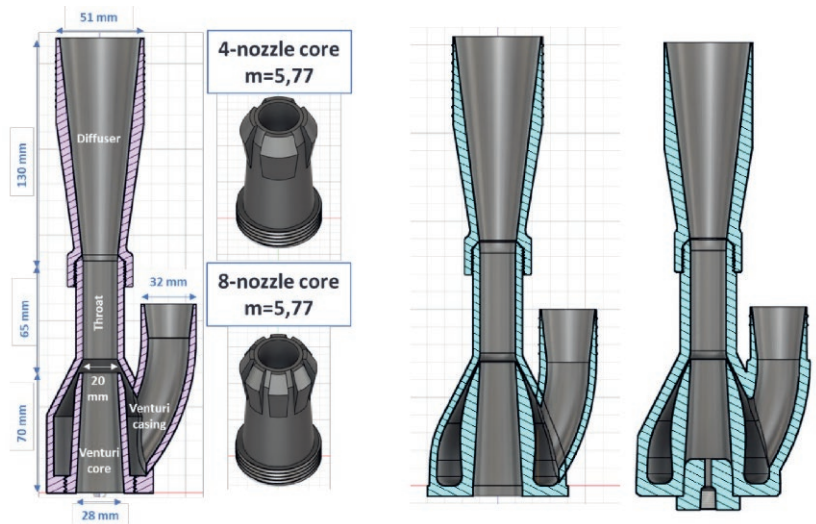
Die Variante 7 mit den unabhängigen Düsen schnitt bei den angegebenen Versuchsbedingungen von 5 bis $6 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 5 bis 6 bar Primäreingangsdruck besser ab, d. h. es wurde ein höherer Unterdruck am Sekundäreingang erreicht als bei der Variante 8.

Da der Termin für die Vorführung von RM1 immer näherrückte, wurde beschlossen, dass die Version 7 während der Vorführung von RM1 und die Version 8 für weitere Tests nach der Vorführung mit einem Einlassdurchsatz von bis zu $10 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einem Druck von 10 bar verwendet werden sollte. Um den höheren Druck für die Version 8 zu ermöglichen, wurde eine spezielle Hochdruckversion der RSP-Konstruktion durch Erhöhung der Gesamtwandstärke vorbereitet. Alle soeben beschriebenen Ausführungen sind in Bild 9 dargestellt.

2.5.4 Fördersystem – Fertigung und Integration

Nachdem die grundsätzliche Konstruktion der RM1-RSP festgelegt war, wurde mit der Integration der RSP in das RM1-Design begonnen. Ziel der Integration war es, die Montage der RSP an

The version 7 with the independent nozzles was found to perform better, i.e. achieving a higher vacuum at the secondary inlet, than the version 8 at the stated test conditions of 5 to 6 m³/h at 5 to 6 bar primary inlet pressure. As the date of demonstration of RM1 was approaching rapidly, it was decided that version 7 was to be used during the demonstration of RM1 and version 8 was to be used for further testing (after the demonstration) with an inlet flow rate of up to 10 m³/h at a pressure of 10 bar. To allow for the higher pressure to be applied to version 8, a special high-pressure version of the AJP design was prepared by increasing overall wall thickness. All the versions just described are presented in figure 9.



2.5.4 Venturi system – Manufacturing and integration

Once the principal design of the RM1 AJP was established, an integration of the AJP into the RM1 boom layout was initiated. The goal of the integration was to allow mounting the AJP on the underside of the boom while attached to a suction nozzle with an integrated screen for classification based on grain size. The classification was established using perforated plates with a range in hole diameter from 10 to 16 mm. As the space underneath the boom is limited, a compact and rounded form factor was sought for the AJP and suction nozzle. Lastly, a mounting system for the AJP and nozzle assembly was also designed and prepared. The developed mounting system is modular allowing the interchanging of parts to enable mounting sensors or auxiliary water nozzle to support excavation.

The use of two side-by-side Venturis enabled a large suction nozzle surface covering the full width of the boom. The two Venturis have a common water inlet and each has its own diffusers from which the output is combined into a single large diameter hose leading to the back of the prototype. The mounting system allows for some flexibility in the (axial) position of the AJP along the boom thus allowing variation of the distance between the suction nozzle and the production tool. The overall design process of the integrated AJP, nozzle and mounting system took a few iterations. The final version is presented in figure 10.

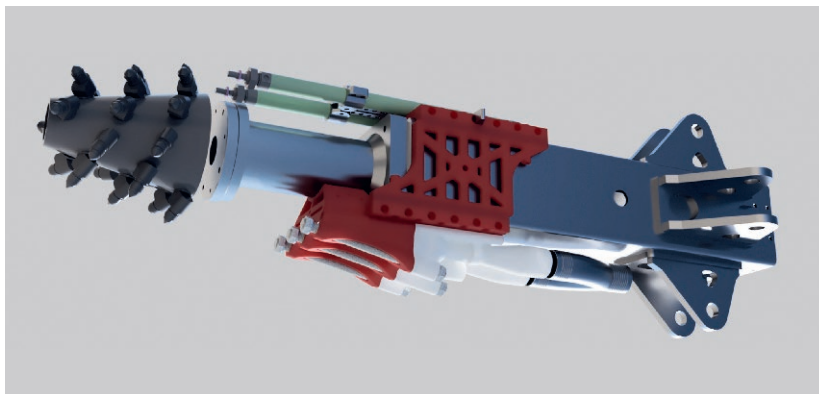


Fig. 10. AJP, suction nozzle and mounting system (iterations 1 and 2).
Bild 10. RSP, Saugdüsen und Halterungen (Iterationen 1 und 2). Source/Quelle: MU Leoben

Fig. 9. RM1 AJP Version 7 including core types (left), Version 8 – intended use up to 6 bar (middle) and Version 8 – intended use up to 10 bar (right). // Bild 9. RM1 RSP Version 7 einschließlich Kerntypen (l.), Version 8 – vorgesehener Einsatz bis 6 bar (m.) und Version 8 – vorgesehener Einsatz bis 10 bar (r.). Source/Quelle: MU Leoben

der Unterseite des Auslegers zu ermöglichen, während sie an einer Saugdüse mit integriertem Sieb zur Klassifizierung nach Korngröße angebracht ist. Die Klassifizierung wurde mit Hilfe von Lochblechen mit einem Lochdurchmesser von 10 bis 16 mm vorgenommen. Da der Platz unter dem Ausleger begrenzt ist, wurde ein kompakter und abgerundeter Formfaktor für die RSP und die Saugdüse gesucht. Schließlich wurde auch ein Montagesystem für die RSP- und Düsenbaugruppe entworfen und vorbereitet. Das entwickelte Montagesystem ist modular aufgebaut, sodass die Teile ausgetauscht werden können, um die Montage von Sensoren oder einer zusätzlichen Wasserdüse zur Unterstützung des Abbauprozesses zu ermöglichen.

Die Verwendung von zwei nebeneinander angeordneten Venturis ermöglichte eine große Saugdüsenfläche, welche die gesamte Breite des Auslegers abdeckt. Die beiden Venturis haben einen gemeinsamen Wassereinlass und jeweils einen eigenen Diffuser, von dem aus der Auslass in einem einzigen Schlauch mit großem Durchmesser zusammengeführt wird, der zur Rückseite des Prototyps führt. Das Montagesystem ermöglicht eine gewisse Flexibilität bei der (axialen) Position der RSP entlang des Auslegers, wodurch der Abstand zwischen der Saugdüse und dem Abbauwerkzeug variiert werden kann. Der gesamte Entwurfsprozess der integrierten RSP, der Düse und des Befestigungssystems erforderte einige Iterationen. Die finale Version ist in Bild 10 dargestellt.

2.5.5 Test und Demonstration

Die Erprobung und Demonstration des RM1-Prototyps fand im Ölschieferbergwerk Kunda nahe der Stadt Rackvere in Estland statt. Das Fördersystem, bestehend aus der Saugdüse mit einer 16 mm-Lochplatte, dem doppelten Venturi-System und dem Montagesystem, wurde während der Demonstration erfolgreich erprobt. Das vollständig montierte Fördersystem, wie es bei der Demonstration verwendet wurde, ist in Bild 11 dargestellt. Die Oberseite des

2.5.5 Testing and demonstration

Testing and demonstration of the RM1 prototype took place in the Kunda oil shale mine near the city of Rakvere in Estonia. The ore collection system comprising the suction nozzle, with a 16 mm holed plate, the double Venturi AJP and the mounting system were successfully operated during the demonstration. The fully assembled ore collection system as used during the demonstration is shown in figure 11. The top of the mounting system has been equipped by a separate sensor system comprising two compressed air-driven pistons.

The ore cut by the production tool during the demonstration is transported to the back of the robot by the Venturi-based slurry pump. This pump is driven by medium pressure water (+/- 5 to 6 bar) flowing through a Venturi and consequently creating a vacuum. A multistage centrifugal pump taking in water from the main water basin was used to provide the medium pressure water flow needed to drive the Venturis. The vacuum created is exerted on a suction nozzle with a holed plate on the underside of the boom, directly behind the production tool.

The system was able to successfully suck up rock particles up to 5 mm and transport them to the back of the robot via the LIBS system (total distance exceeding 20 m). The Venturi pump was unsuccessful in extracting all the cut rock by the production tool as the grain size after cutting was too large and could consequently not pass the sieve on the Venturi nozzle. This was expected considering the faulted nature of the ore rock at the Rakvere site. The cutterhead has been able to cut rock to the desired grain size in the laboratory, albeit this was on unfractured samples thus enabling a consistent small particle size for the excavated material.

2.5.6 Future development

To enable the Venturi to extract all the ore rock cut by the production head, the grainsize must be consistently smaller and/or the passing size of the Venturi system needs to be larger. Another improvement would be to use a hollow production tool which allows material to be sucked through the cutter head and into a concentric Venturi system just behind the cutter head. In this way, cut ore rock will mostly be sucked directly into the ore collection system rather than falling on the floor. Secondary Venturi pumps/suction nozzles could be installed near the floor in front of the robot's locomotion system to ensure an ore-free path for the robot to move forward on. A rotary crusher can be integrated into this design to ensure a suitable grain size distribution and consequently full extraction of all ore rock excavated by the production tool.

Notwithstanding the shortcomings of the ore collection system developed for the ROBOMINERS prototype RM1, Venturi pumps are believed to be relevant for robotic mining in the future due to their simplicity. This simplicity is created by the lack of moving parts in the Venturi pump and the ability to use water as both the pump's driving force and the transport fluid for a slurry. In submerged robotic mining situations, a Venturi-based pump could drive a very reliable ore collection system without the need for extensive maintenance and the possibility to make (simple) components onsite using 3D printing technology rather than having to order complex parts from a warehouse (far) offsite.



Fig. 11. Fully assembled ore collection system comprising nozzle (red), Venturi (clear) and mounting brackets (red) as well as all in- and output hoses. // Bild 11. Zusammengebautes Fördersystem (rot) Venturi (transparent) und Halterung (rot) sowie Zu- und Abflussleitungen. Photo/Foto: Source/Quelle: MU Leoben

Montagesystems wurde mit einem separaten Sensorsystem ausgestattet, das aus zwei druckluftbetriebenen Kolben besteht.

Das vom Abbauwerkzeug während der Demonstration geschnittene Erz wird mit der Venturi-Pumpe zum hinteren Teil des Roboters transportiert. Diese Pumpe wird durch Wasser mit mittlerem Druck (+/- 5 bis 6 bar) angetrieben, das durch eine Venturi-Pumpe fließt und somit ein Vakuum erzeugt. Eine mehrstufige Zentrifugalpumpe, die Wasser aus dem Hauptwasserbecken ansaugt, wurde verwendet, um den für den Antrieb der Venturis erforderlichen Wasserstrom mit mittlerem Druck zu erzeugen. Der erzeugte Unterdruck wird auf eine Saugdüse mit einer Lochplatte an der Unterseite des Auslegers, direkt hinter dem Abbauwerkzeug, ausgeübt.

Das System war in der Lage, Gesteinspartikel bis zu 5 mm aufzusaugen und sie über das LIBS-System zur Rückseite des Roboters zu befördern (Gesamtstrecke über 20 m). Der Venturi-Pumpe gelang es nicht, das gesamte geschnittene Gestein abzusaugen, da die Korngröße nach dem Schneiden zu groß war und folglich das Sieb an der Venturi-Düse nicht passieren konnte. Dies war in Anbetracht der Beschaffenheit des Gesteins am Standort Rakvere zu erwarten. Im Labor konnte der Schneidkopf das Gestein auf die gewünschte Korngröße zerkleinern, auch wenn es sich dabei um nicht zerklüftete Proben handelte, sodass eine gleichbleibend kleine Partikelgröße für das abgebaute Material erzielt werden konnte.

2.5.6 Zukünftige Entwicklungen

Damit das Fördersystem das gesamte vom Schneidkopf geschnittene Gestein extrahieren kann, muss die Korngröße durchweg kleiner und/oder die Durchlassgröße des Venturi-Systems größer sein. Eine weitere Verbesserung wäre die Verwendung eines hohlen Abbauwerkzeugs, mit dem das Material durch den Schneidkopf und in ein konzentrisches Venturisystem direkt hinter dem Schneidkopf



Fig. 12. Slurry spectrometer installed along the slurry transport line in the Kunda open pit mine (13).

Bild 12. Slurry-Spektrometer im Kunda-Tagebau (13).

2.6 Mineralogical segment sensors

The LIBS and X-Ray Fluorescence (XRF) techniques exhibit advanced elemental measurement capabilities and are widely used, including as cross-belt analyzers in mineral processing. LIBS, though limited in homogeneity assessment, offers a straightforward spectroscopic setup and broader elemental detection capabilities compared to XRF, especially for elements with atomic numbers below 20. The growing interest in LIBS for geological analysis arises from its simplicity, cost-effectiveness, simultaneous multi-elemental analysis and extensive elemental detection. The wealth of information present in each LIBS spectrum, with thousands of emission peaks, poses challenges in real-time and reliable data processing. However, advancements in computing power and dedicated machine learning methods are improving the efficiency of real-time LIBS data treatment, making the interpretation of mineral contents from elemental LIBS results more reliable (as exemplified in (12)). (13)

In July 2023, a field demonstration took place at the Kunda mine, showcasing the operation of the slurry analyzer integrated with the ROBOMINERS RM1 prototype. The Kunda mine exploits oil shale deposits in an open-pit configuration. The purpose of this demonstration was to functionally illustrate how the LIBS slurry analyzer (Figure 12) could provide a qualitative output of the extracted material by RM1. The field tests were successful, with continuous acquisition of LIBS spectra during RM1 operation. A special software was adapted for the demonstration, displaying the raw peak heights of a few elements present in the extracted material, including silicon (Si), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al) and iron (Fe). The detected iron likely originated from pyrite (FeS_2) occurrences in the oil shale layers. (13)

3 RM1 field test

The purpose of the field tests and demonstrations was to both test and publicly demonstrate capabilities of the ROBOMINERS RM1 prototype and sensors developed in the project. Following the successful full commissioning of RM1, it was relocated to the designated area for further testing and demonstration (Figure 13). The subsequent testing phase focused on validating the performance of the production tool module and locomotion. Control algorithms for both the production tool module and locomotion functions were refined during testing to enhance their respon-

gesaugt werden kann. Auf diese Weise wird das geschnittene Erzgestein größtenteils direkt in das Fördersystem gesaugt und fällt nicht auf den Boden. Sekundäre Venturi-Pumpen/Saugdüsen könnten in Bodennähe vor dem Fortbewegungssystem des Roboters installiert werden, um einen erzfreien Weg für die Fortbewegung des Roboters zu gewährleisten. In diese Konstruktion kann ein Brecher integriert werden, um eine geeignete Korngrößenverteilung und damit die vollständige Gewinnung des gesamten vom Abbauwerkzeug abgebauten Gesteins sicherzustellen.

Trotz der Unzulänglichkeiten des für den ROBOMINERS-Prototyp RM1 entwickelten Fördersystems wird davon ausgegangen, dass Venturi-Pumpen aufgrund ihrer Einfachheit in Zukunft für den Roboterbergbau von Bedeutung sein werden. Diese Einfachheit ergibt sich aus dem Fehlen beweglicher Teile in der Venturi-Pumpe und der Möglichkeit, Wasser sowohl als Antriebskraft der Pumpe als auch als Transportflüssigkeit für einen Schlamm zu verwenden. Im Unterwasser-Roboterbergbau könnte eine Venturi-Pumpe ein sehr zuverlässiges Fördersystem antreiben, ohne dass umfangreiche Wartungsarbeiten erforderlich wären, und die Möglichkeit bieten, (einfache) Komponenten vor Ort mithilfe der 3D-Drucktechnologie herzustellen, anstatt komplexe Teile aus einem (weit) entfernten Lager zu nehmen.

2.6 Mineralogische Sensoren

Die LIBS- und Röntgenfluoreszenz (XRF)-Techniken bieten fortschrittliche Möglichkeiten zur Elementmessung und sind weit verbreitet. LIBS ist zwar bei der Beurteilung der Homogenität des Gesteins eingeschränkt, bietet aber einen einfachen spektroskopischen Aufbau und im Vergleich zur XRF umfassendere Elementnachweismöglichkeiten, insbesondere für Elemente mit Ordnungszahlen unter 20. Das wachsende Interesse an LIBS für geologische Analysen ergibt sich aus der Einfachheit, der Kosteneffizienz, der gleichzeitigen Multielementanalyse und dem umfassenden Elementnachweis. Die Fülle an Informationen, die jedes LIBS-Spektrum mit Tausenden von Emissionspeaks enthält, stellt eine Herausforderung für die Echtzeit- und zuverlässige Datenverarbeitung dar. Fortschritte bei der Rechenleistung und spezielle Methoden des maschinellen Lernens verbessern jedoch die Effizienz der Echtzeitverarbeitung von LIBS-Daten und machen die Interpretation von Mineralgehalten aus elementaren LIBS-Ergebnissen zuverlässiger (12). (13)

Im Juli 2023 fand im Bergwerk Kunda eine Feldvorführung statt, bei der die Funktionsweise des in den ROBOMINERS RM1-Prototyp integrierten Fördersystems demonstriert wurde. Dort werden Ölschiefervorkommen im Tagebau abgebaut. Der Zweck dieser Demonstration bestand darin, die Funktionsweise des LIBS-Analysators (Bild 12) zu veranschaulichen, der mit Hilfe von RM1 ein qualitatives Ergebnis des gefördert Materials liefern kann. Die Feldversuche waren erfolgreich, wobei während des Betriebs von RM1 kontinuierlich LIBS-Spektren erfasst wurden. Für die Demonstration wurde eine spezielle Software angepasst, welche die rohen Peakhöhen einiger im extrahierten Material vorhandener Elemente anzeigt, darunter Silizium (Si), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Aluminium (Al) und Eisen (Fe). Das nachgewiesene Eisen stammt wahrscheinlich vom Pyrit (FeS_2), der in den Ölschieferschichten vorkommt. (13)

3 RM1-Feldversuche

Zweck der Feldtests und Demonstrationen war es, die Fähigkeiten des ROBOMINERS RM1-Prototyps und der im Rahmen des Pro-

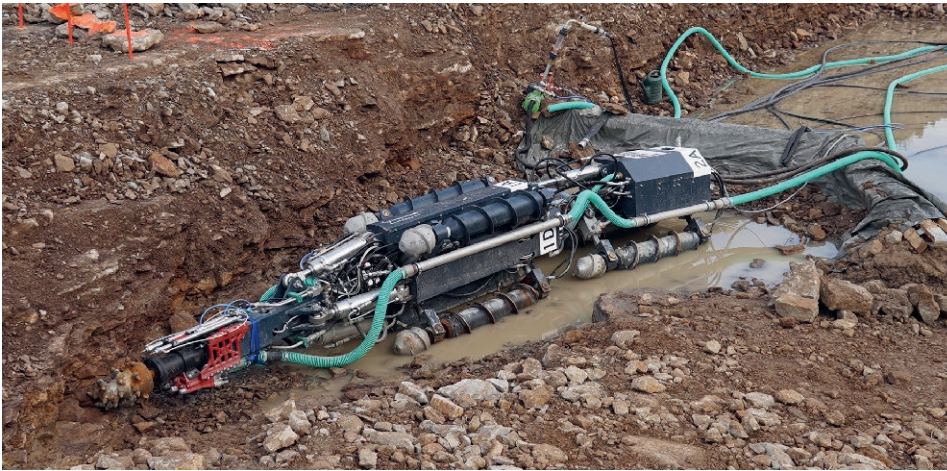


Fig. 13. ROBOMINERS RM1 Prototyp (13). // Bild 13. ROBOMINERS RM1-Prototyp (13).

siveness under real-life non-ideal conditions. RM1 was tested successfully and presented in public demonstrations to different audiences. Demonstrations were performed in dry conditions as well as with the robot partially submerged. (14)

Funding

This project has received funding from the European Union's Horizon2020 research and innovation programme under grant agreement No. 820971.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Hiltz, R. (2020): Taking a step into the robotic future. Url: <https://www.miningmagazine.com/innovation/news/1387411/taking-step-into-the-robotic-future> (visited on 19/12/2023).
- (2) Siciliano, B.; Khatib, O. (Hg.) (2008): Springer Handbook of Robotics. Springer Berlin, Heidelberg. Springer Handbooks. ISBN 9783540303015.
- (3) Berner, M.; Sifferlinger, N. A. (2021): H2020 – ROBOMINERS. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 166.2, S. 59–63. ISSN: 0005-8912. doi: 10.1007/s00501-020-01074-y.
- (4) European Commission (2018): ROBOMINERS Proposal SEP-210520664. Resilient Bio-inspired Modular Robotic Miners / ROBOMINERS.
- (5) Aaltonen, J. et al. (2020): ROBOMINERS deliverable D3.2: Robot conceptual design report. Ed. by ROBOMINERS Consortium.
- (6) Aaltonen, J. et al. (2020): ROBOMINERS deliverable D3.1. Robominer requirement specification. Ed. by ROBOMINERS Consortium.
- (7) Aaltonen, J. et al. (2022): ROBOMINERS deliverable D3.3. Robominer subsystems and components laboratory test report. Ed. by ROBOMINERS Consortium.
- (8) Berner, M.; Sifferlinger, N. A. (2020): Analysis of Excavation Methods for a Small-scale Mining Robot. In: Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics (ISARC). Kitakyushu, Japan (Online Conference), pp 481 – 490. doi: 10.22260/ISARC2020/0067.
- (9) Berner, M. (2023): Applicability Assessment of Excavation Tools for Small-scale Mining Robots. PhD thesis. Montanuniversität Leoben, 2023. doi: <https://doi.org/10.34901/mul.pub.2023.159>.
- (10) Stasi, G. et al. (2023): ROBOMINERS deliverable D6.2. Solid-state and mid-range perception sensors. Ed. by ROBOMINERS Consortium.

jekts entwickelten Sensoren zu testen und öffentlich zu demonstrieren. Nach der erfolgreichen vollständigen Inbetriebnahme von RM1 wurde er für weitere Tests und Demonstrationen in das vorgesehene Gebiet verlegt (Bild 13). Die anschließende Testphase konzentrierte sich auf die Validierung der Leistung des Abbauwerkzeugs und der Fortbewegung. Die Steuerungsalgorithmen sowohl für den Schneidarm als auch für die Fortbewegungsfunktionen wurden während der Tests verfeinert, um ihre Reaktionsfähigkeit unter realen, nicht idealen Bedingungen zu verbessern. RM1 wurde erfolgreich getestet und in öffentlichen Vorführungen vor un-

terschiedlichem Publikum präsentiert. Die Vorführungen wurden sowohl im Trockenen als auch mit teilweise untergetauchtem Roboter durchgeführt. (14)

Finanzierung

Dieses Projekt wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon2020 der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 820971 finanziert.

- (11) Xu, K.; Wang, G.; Wang, L. et al. (2020): Parameter Analysis and Optimization of Annular Jet Pump Based on Kriging Model. In: Appl. Sci. 2020, 10, 7860. doi: 10.3390/app10217860.
- (12) Baele, J.-M. et al. (2021): Trace-element imaging at macroscopic scale in a Belgian sphalerite-galena ore using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). In: Geologica Belgica. 24. 125-136. doi: 10.20341/gb.2021.003.
- (13) Burlet, C. (2023): ROBOMINERS deliverable D6.3. Mineralogical segment sensors. Ed. by ROBOMINERS Consortium.
- (14) Aaltonen, J. et al. (2023): ROBOMINERS deliverable D7.3. Field test report. Ed. by ROBOMINERS Consortium.

Authors / Autoren

Dr. mont. Michael Berner, Senior Researcher, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft – Fördertechnik und Konstruktionslehre, Montanuniversität Leoben, Leoben/Österreich, Tobias Pinkse M. Sc., Managing Director, REinvent GmbH, Sondershausen/Deutschland, Sadia Riaz M. Sc., Researcher, Tampere University, Tampere/Finnland