Berg Huettenmaenn Monatsh (2021) Vol. 166 (2): 59–63
<https://doi.org/10.1007/s00501-020-01074-y>
 © Der/die Autor(en) 2021

BHM Berg- und
 Hüttenmännische
 Monatshefte

H2020 – ROBOMINERS

Michael Berner und Nikolaus August Sifferlinger

Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen 26. November 2020; angenommen 17. Dezember 2020; online publiziert 14. Januar 2021

Zusammenfassung: Der folgende Artikel beschäftigt sich mit dem EU-H2020 Projekt ROBOMINERS mit Schwerpunkt auf den Aufgaben der Montanuniversität Leoben, die die Entwicklung der Abbaueinheit eines kleinen Bergbauroboters umfassen. Die einzelnen Technologien werden hinsichtlich ihrer Effizienz und Machbarkeit bewertet, indem vorhandene Technologien untersucht und analytische Studien, Simulationen bis hin zu Konzeptentwicklungen durchgeführt werden. Dies beinhaltet konventionelle, alternative und kombinierte Abbaumethoden. Der Beitrag dieser Arbeit soll weiters eine Richtlinie zur Anwendbarkeit potenzieller Abbaumethoden für Bergbau-Roboter in unterschiedlichen Klassen liefern.

Schlüsselwörter: Bergbau, Montanmaschinenbau, Abbaumethoden, Robotik

H2020 – ROBOMINERS

Abstract: The following article discusses the EU H2020 project ROBOMINERS with a focus on the tasks to be done by the University of Leoben, which cover the development of the production tool system of a small-scale mining robot. The individual technologies will be assessed in terms of their efficiency and feasibility by surveying existing technologies, conducting analytical studies and simulations and eventually developing concepts. This includes conventional, alternative, and combined excavation tools. The contribution of this work further provides a guideline of applicability of potential excavation methods for robotic mining machines in various classes.

Keywords: Mining, Heavy-duty engineering, Excavation methods, Robotics

Dipl.-Ing. M. Berner (✉)
 Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
 Montanuniversität Leoben,
 Franz-Josef-Straße 18,
 8700 Leoben, Österreich
michael.berner@unileoben.ac.at

1. Einleitung

Selektiver Bergbau beschreibt eine Methode, die hochgradigen Bestandteile des Erzes zu gewinnen und dabei die minderwertigen Bestandteile zurückzulassen. Ziel ist die Maximierung der Rohstoffgewinnung bei gleichbleibenden oder sinkenden Kosten durch Minimierung der kostentreibenden Faktoren.

Die gefährlichen und risikoreichen Umgebungen in Untertagebauen verlangen nach semiautonomem oder autonomen Lösungen für Maschinen und Prozesse. Nach [1] können folgende Technologietreiber im Bergbau definiert werden: Arbeitsumgebung, Arbeitskräftemangel, Gesundheit und Sicherheit, Betriebseffizienz und Nachhaltigkeit.

Das Potenzial von klassischen Abbaumethoden für selektiven Bergbau ist bis zum jetzigen Zeitpunkt stark begrenzt. Als große Herausforderungen erweisen sich die benötigte Flexibilität und die Fähigkeit, Gestein mit hohen Festigkeiten abzubauen [2, 3]. Üblicherweise weisen Bergbaumaschinen ein sehr hohes Gewicht bis zu einigen 100 Tonnen auf, wobei hingegen „klassische“ Roboter eher im unteren Bereich (>500 kg) rangieren (Abb. 1). Um diese Lücke zwischen den beiden Extrema zu füllen, bedarf es der Entwicklung neuer, mobiler Bergbau-Roboter (engl. Robominers) [4].

Korrekt betrachtet befinden sich bereits Roboter in Untertagebauen: Vereinzelte Bohrgeräte, Gewinnungsmaschinen und Transportfahrzeuge können bereits vollständig automatisiert und (teil-)autonom betrieben werden [5, 6]. Für erfolgreichen, selektiven Bergbau benötigt es jedoch große Anstrengungen und Entwicklungen innovativer Maschinerie.

Vergangene sowie aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Entwicklung von Robotern und Ausrüstung für die Erforschung schwer zugänglicher Lagerstätten, Erschließung neuer, unberührter Gebiete und Gewinnung von Rohstoffen [7–10].

Die endliche Menge an Rohstofflagerstätten, welche durch die Erdoberfläche erreicht werden können, zwingt die Industrie, in andere Gebiete einzudringen. Im Hinblick auf Erforschung und Erschließung dieser Areale erfordert es zusätzlich neue Technologien und Werkzeuge.

Abb. 1: Gewichtsklassen – Roboter und Bergbaumaschinen [4]

Aktuelle Projekte beschäftigen sich ausgiebig mit dem, bis dato sehr gering erforschten, Unterwasser-Bergbau [8, 11, 12]. Auf den Ozeanböden findet man polymetallische Knollen, auch genannt Raucher [12]. Das kommerzielle Erschließen dieser Bodenschätze ist, mitunter aufgrund ökologischer Aspekte, zu diesem Zeitpunkt noch im Anfangsstadium. Jedoch befassen sich diverse Forschungsgruppierungen mit der Entwicklung machbarer Systeme [8, 11, 12].

Ein weiteres, in ferner Zukunft stehendes, potenzielles Anwendungsgebiet selektiver Bergbau-Roboter sind extraterrestrische Aktivitäten. Mit einer erneut geplanten Mondlandung sollen mittels moderner Roboter Proben aus der Oberfläche extrahiert werden. Diese Forschung dient zum einen der Erforschung der Mondoberfläche, es soll jedoch auch als Grundstein für weiteren Weltraumbergbau dienen [13].

Mithilfe von kleineren Maschinen soll es ermöglicht werden, selektiven Bergbau in einem wirtschaftlich und ökologisch vertretbaren Stil durchzuführen.

2. Einführung H2020 – ROBOMINERS

Obwohl es derzeit noch keinen Mangel an Rohstoffen gibt, ist die Zugänglichkeit zu einem großen Teil der existierenden Lagerstätten mithilfe herkömmlicher Explorationsmethoden und Abbautechnologien stark eingeschränkt. Der Einsatz von Robotern für einzelne ausgewählte Tätigkeiten ist hierbei unumgänglich. Im Untertagebau ist ein Trend in Richtung vollständiger Mechanisierung und Automatisierung zu erkennen. Grundgedanken des Projektes ROBOMINERS sind die Erforschung neuer Technologien und Erschließung neuer, schwer erreichbarer Einsatzorte. Verlassene Minen, kleine Lagerstätten und Ultratiefen (>3000m unter der Oberfläche) eignen sich als potenzielle Anwendungsbereiche. Die Vielfältigkeit der Einsatzgebiete erfordert ein hohes Maß an Flexibilität und Modularität des Roboters. Das bio-inspirierte Design ermöglicht es,

den Roboter wesentlich kleiner, leichter und flexibler als konventionelle Bergbaumaschinen zu gestalten.

Im ersten Schritt wird der Roboter mit seinen Modulen untertage gebracht, wobei dieser je nach Anwendungsfall und Einsatzgebiet unterschiedlich konfiguriert wird. Rohstoffe werden mit speziell entwickelten Navigations- und Sensorsystemen aufgefunden, und mithilfe von Messungen und Probenahmen wird das abgebaute Material analysiert. In weiterer Folge werden größere Mengen an Mate-

Abb. 2: ROBOMINERS – Konzept [4]

rial abgebaut, aufgeschlmmt und abtransportiert. Dieses Konzept ist in Abb. 2 dargestellt.

Das von der EU gefrderte Projekt wird mithilfe von 14 Partnern aus 11 europischen Lndern durchgefhrt. Die Montanuniversitt Leoben bernimmt als Partner die Projektleitung zweier wesentlicher Arbeitspakete. Hauptaufgaben hierbei sind die Entwicklung und Konzeptionierung eines selektiven Abbauproduktionsystems, welches in der Lage ist, Gestein fr anschlieende Analysen abzubauen. Die verfgbare Leistung sowie die zu erwartenden Reaktionskrfte sind entscheidend fr die Auswahl des Abbauproduktionsystems. Hierfr werden die unterschiedlichen Abbaumethoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit fr einen mobilen Bergbau-Roboter analysiert. Zu diesen zhlen mechanische Abbaumethoden, Bohren und Sprengen, kombinierte und alternative Abbaumethoden. Anhand von Studien, Laborttigkeiten und Simulationen sollen die jeweiligen Technologien bewertet werden, und abschlieend soll ein Konzept fr das Abbauproduktionsystem erstellt werden. Ziel dieses Projektes ist ein konzeptioneller Beweis fr die Machbarkeit dieser Technologie mit einem Technology Readiness Level (TRL) 4.

Die Technologie knnte einen Grundstein legen, der EU Zugang zu mineralischen Rohstoffen aus heimischen Quellen zu ermglichen, die sonst unzugnglich sind oder als unwirtschaftlich erachtet werden.

3. Anwendbare Abbautechnologien und Entwicklung des Abbauproduktionsystems

Nachfolgend wird auf die festgelegten Aufgaben, welche der Entwicklung der Abbaueinheit zugeordnet sind, nher eingegangen.

3.1 Analyse bestehender Technologien und Bewertung der Abbaumethoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit fr einen mobilen Bergbau-Roboter

In diesem Arbeitspaket werden bestehende Abbaumethoden in ihren unterschiedlichsten Ausfhrungen und Anwendungen analysiert, Produkte sowie Forschungsprojekte nher untersucht und abschlieend mittels Studien, Analysen

und Simulationen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet.

Zu Beginn mssen die unterschiedlichen Abbaumethoden klassifiziert werden. Diese knnen unterteilt werden in: Bohren und Sprengen, mechanische, alternative und kombinierte Abbaumethoden. Die in Abb. 3 dargestellten Methoden bilden die Grundlage fr die Forschungsarbeiten. Hierbei handelt es sich um anerkannte Methoden, Material zu lsen. Bohren und Sprengen sowie mechanisches Schneiden gelten als gngigste Abbaumethoden im Untertagebau. Zustzlich behandelt werden wenig bekanntere Technologien, welche sich jedoch durch ihre Anwendbarkeit als relevant herausstellen. Mechanische Schneidsysteme gelten als sehr flexibel, im Hinblick auf die Gesteinsfestigkeit erreichen sie jedoch schnell ihre Grenzen. Bei hheren Gesteinsfestigkeiten wird Bohren und Sprengen als favorisierte Technologie angesehen. Ein groer Nachteil dieses Abbaumethodens ist die diskontinuierliche Operation. Fr niedrige Gesteinsfestigkeiten bzw. spezielle Anforderungen werden andere mechanische Abbaumethoden eingesetzt. Alternative und kombinierte Abbaumethoden wurden entwickelt, um den Defiziten der vorhin genannten Methoden entgegenzuwirken und die Effizienz einzelner Verfahren zu steigern.

Im nchsten Schritt sollen die unterschiedlichen Abbaumethoden anhand folgender Kriterien bewertet werden:

- Maximal bearbeitbare Gesteinsfestigkeit (UCS) und Abbrsivitt (CAI)
- Leistungsspektrum
- Reaktionskrfte
- Spezifische Energie
- Flexibilitt
- Abbaurate bzw. Vortriebsrate
- Wartung
- Gewicht
- Automation und Implementierung
- Kosten

Mithilfe von Literatur und analytischen Studien sollen erste Abschtzungen der spezifischen Energien, Leistungen, Reaktionskrfte und Abbauraten durchgefhrt werden, um die Abbaumethoden qualitativ und quantitativ gegenberstellen zu knnen. Da Roboter nur begrenzte Leistung und eine vergleichsweise geringe Masse aufweisen, knnen ei-

Abb. 3: bersicht Abbaumethoden

Bohren und Sprengen	Mechanische Abbaumethoden	Alternative Abbaumethoden	Kombinierte Abbaumethoden
	• Bohren • Mechanisches Schneiden • Abbruchhammer • Frsen • Sgen • Schleifen • Bohrschnecke • Baggern	• Hochdruck-Wasserstrahlschneiden • Hydrofracturing • Laserschneiden • Radiales-axiales Brechen • Plasmasprengen • Chemische Methoden	• Hochdruckwasser kombiniert mit Bohren • Hochdruckwasser kombiniert mit mechanischem Schneiden • Mikrowellen kombiniert mit mechanischem Schneiden • Ultraschallbohren

nige Methoden sehr schlecht bzw. nicht eingesetzt werden. Diese Kennwerte dienen als Basis für die Erstellung einer Bewertungsmatrix, um ideale Szenarien für diese Methoden zu erstellen. Für die detaillierte Analyse und Auslegung müssen im nächsten Schritt realistische Szenarien und Anforderungen aufgestellt werden. Diese beinhalten den Einsatzort, das abzubauen Gestein, die gewünschte Abbau- menge pro Zeiteinheit sowie die zur Verfügung stehende Leistung und aufnehmbaren Reaktionskräfte. Im Kernteil der Arbeit werden verschiedene Konzepte erarbeitet, welche den Anforderungen gerecht werden und in einem mobilen Roboter als Abbauwerkzeug implementiert werden können.

Die Konzeptionierung beinhaltet folgende, wesentliche Aufgaben: analytische Berechnungen, Definition von Systemgrößen und Einsatzgrenzen, Auslegungen, Simulationen sowie 3D-CAD Konstruktionen. Simulationen dienen vorrangig der Berechnung der Reaktionskräfte und erforderlichen Leistung, sollen aber auch für Festigkeitsnachweise herangezogen werden. Die Resultate sollen einen Überblick über die Anwendbarkeit der unterschiedlichen Abbauverfahren geben sowie Konzepte für ausgewählte Szenarien und Anforderungen beinhalten.

3.2 Konzeptfindung

In diesem Arbeitspaket sollen die Erkenntnisse, welche aus der vorangegangenen Arbeit gewonnen wurden, angewendet werden, um das Abbauwerkzeug für einen speziellen Bergbau-Roboter zu entwickeln. Dieses Arbeitspaket umschließt die Konzeptionierung, Tests im Labor und die Fertigung eines Prototyps. Die Konzepterstellung erfolgt für definierte Einsatzgebiete und soll anhand der Anforderungen erstellt werden. Das ausgewählte Abbauwerkzeug wird mittels 3D-CAD Konstruktionen und Simulationen konzeptualisiert, in repräsentativen Laborversuchen getestet und abschließend in einem Prototyp implementiert.

In den finalen Testversuchen des Prototyps sollen grundlegende Fähigkeiten und Technologien mit TRL 3–5 bestätigt werden.

4. Ausblick

Im abschließenden Abschnitt soll eine Idee für den potenziellen zukünftigen Einsatz von Robotern im Bergbau beschrieben werden.

4.1 Mögliche Anwendungsbiete

Die Einschränkung der Zugänglichkeit zu Rohstoffen erfordert die Erschließung neuer Lagerstätten bzw. Entwicklung neuer Technologien. Einige dieser Szenarien setzen den Einsatz von Robotern zur Ausführung bestimmter Aufgaben voraus. Bereits geschlossene Minen stellen ein sehr gutes Beispiel für den Einsatz von Robotern dar, da diese einige Vorteile mit sich bringen: Minimierung des Risikos

für Personen, effizienteres Ausführen bestimmter Arbeitsaufgaben und langzeitige Kostensenkung.

Weltweit findet man viele Lagerstätten, bei welchen ein Bergbau mit konventionellen Methoden nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Eine große Anzahl der verlassenen Minen wurde nach der Auflösung geflutet. Durch die Entwicklung dafür geeigneter Roboter würde eine vorherige Entwässerung nicht notwendig sein. Weiters findet man Rohstoffe in Ultratiefen, welche bis jetzt noch nicht erschlossen werden konnten. Zukünftig sollen diese mit selbständig arbeitenden Bergbaumaschinen erschlossen werden können.

Grundlegend muss noch festgehalten werden, dass Roboter gegenüber konventionellen Bergbaumaschinen Vorteile (Flexibilität, Mobilität, etc.) aufweisen, diese jedoch, aufgrund der vergleichsweise sehr geringen Abbaurate, nicht vollständig ablösen können. Für spezielle Szenarien und Aufgaben wird der Einsatz von Robotern dennoch als sinnvoll und vielversprechend erachtet.

4.2 Aufgaben von Robotern

Ziel des Projektes ist es, einen voll mechanisierten und automatisierten Bergbau-Roboter zu entwickeln, der in der Lage ist, den Rohstoff aufzufinden, anschließend zu lösen und zu transportieren. Zum besseren Verständnis der Komplexität des Gesamtsystems müssen einige wichtige Punkte diskutiert werden: Neben den Lösewerkzeugen erfordert es eine Reihe weiterer Instrumente und Werkzeuge für eine erfolgreiche Anwendung.

Eine vollständig autonome Navigation und Wahrnehmung fordern entsprechende Technologien (Kameras, Radar, Lidar, etc.). Entnommene Materialproben sollen für den Abbauprozess als Entscheidungshilfe für die Rohstoffgewinnung dienen. Individuelle Materialproben sollen bereits on-board hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert werden (z.B. mithilfe LIBS oder XRF) und abhängig vom jeweiligen Abbaufahren werden Werkzeuge zur Zerkleinerung des abgebauten Materials benötigt.

Anschließend soll das gewonnen Material zu einem definierten Bereich (Zwischenlagerstätte oder Oberfläche) gefördert werden. Als geeignete Fördermethoden erweisen sich unterschiedliche Systeme. Ein praktischer Ansatz das Material zu transportieren, ist die Aufschlammung des gelösten Materials.

Weiters begleiten einige Nebenaufgaben, wie Einrichten der Infrastruktur, Stabilisierung des Untertagebaus, Wartung und Hilfsarbeiten, die Haupttätigkeiten.

Die oben genannten Aufgaben beschreiben ein für Roboter potenzielles, futuristisches Ökosystem. Um dieses Ökosystem, in einen vollständig autonom arbeitenden Betrieb zu verwandeln, ist nicht zu vermeiden, den einzelnen Aufgaben dezidierte Roboter zuzuweisen.

Ein modularer Aufbau mit einem universellen Grund- oder Hauptmodul erhöht die Flexibilität in der Anwendung. Das Hauptmodul bildet die Basis jedes einzelnen Roboters und je nach Anwendung, werden die Instrumente und Werkzeuge individuell angepasst.

Förderung. This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 820971.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Siciliano, B.; Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.
2. Bilgin, N.; Copur, H.; Balci, C.: Mechanical excavation in mining and civil industries. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2014. ISBN 9781466584747.
3. Sifferlinger, N.A.; Hartlieb, P.; Moser, P.: The Importance of Research on Alternative and Hybrid Rock Extraction Methods [online]. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2017, 162(2), 58–66. ISSN 0005-8912. <https://doi.org/10.1007/s00501-017-0574-y>
4. ROBOMINERS Consortium. Horizon 2020—Proposal ROBOMINERS.
5. How Mining Robots are Replacing Humans and Saving Lives. RobotShop Community [online], 2019. 7 July 2020, <https://www.robotshop.com/community/blog/show/how-mining-robots-are-replacing-humans-and-saving-lives> (18. November 2020)
6. Hiltz, R.: Taking a step into the robotic future [online], 2020. 29 May 2020, <https://www.miningmagazine.com/innovation/news/1387411/taking-step-into-the-robotic-future> (18. November 2020)
7. Aykul, H.; Yalcin, E.; Ediz, I.; Dixon-Hardy, D.; Akcakoca, H.: Equipment Selection for High Selective Excavation Surface Coal Mining. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2007, 107, 195–210.
8. Bakker, E.; Žibret, G.; Rainbird J.: The ¡Vamos! Sustainable Underwater Mining Solution [online], 2017. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1095552>
9. Firstbrook, D.; Worrall, K.; Harkness, P.; Flessa, T.; McGookin, E.; Thomson, D.: Ultrasonic Auger for Narrow-Gauge Borehole Drilling. In: 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 22–25 Oct. 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 1–4. ISBN 978-1-5386-3425-7.
10. Xuan, T.; Bui, X.-N.; Thu Hoa, L.T.: Research on suitable selective mining technology for extracting the ore of type I at the Laocai apatite mine. In: International Conference on Advances in Mining and Tunneling, 2008.
11. Miedema, S.A.: Dredging Processes, The cutting of Sand, Clay & Rock, Excavating Equipment. Lecture Notes: Delft University of Technology, 2012.
12. Sharma, R.: Hg. Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 9783319525563.
13. Mueller, R.P.; Cox, R.E.; Ebert, T.; Smith, J.D.; Schuler, J.M.; Nick, A.J.: Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot (RASSOR). In: IEEE Aerospace Conference, 2013. 2–9 March 2013, Big Sky, Montana. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 1–12. ISBN 978-1-4673-1813-6.

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.