BHM (2017) Vol. 162 (6): 227–231

DOI 10.1007/s00501-017-0607-6

© Der/die Autor(en) 2017.

Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Geotechnische Beurteilung eines untertägigen Bergbaues

Sebastian Schinagl und Anja MoserLehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Department Mineral Resources Engineering,
Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen 2. Mai 2017; angenommen 3. Mai 2017; online publiziert 22. Mai 2017

Zusammenfassung: Im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft der Montanuniversität Leoben wurde eine geotechnische Beurteilung eines Abbaureviers in einem untertägigen Bergbau durchgeführt. Das Ziel dieser Arbeit war die Quantifizierung der mechanischen Gebirgseigenschaften unter Zuhilfenahme von unterschiedlichen Verfahren der Gebirgsklassifikation, von Laborversuchen sowie von empirischen Verfahren der Gebirgsfestigkeitsbestimmung. Abschließend wurde auf Basis einer statistischen Auswertung eine repräsentative Gebirgsfestigkeit abgeschätzt. Diese gibt einen ersten Anhaltspunkt für die Stabilität des untertägigen Hohlraumes und kann künftig als Eingangsparameter in numerischen Simulationen verwendet werden.

Schlüsselwörter: Gebirgsmechanik, Untertagebergbau, Gebirgsklassifikation, Gebirgsfestigkeit

Geotechnical Assessment of an Underground Mine

Abstract: Within the framework of a master thesis at the Chair of Mining Engineering and Mineral Economics of the Montanuniversität Leoben the geotechnical assessment of a mining panel in an underground mine was performed. The goal of this assessment was the quantification of the mechanical properties of the rock mass using different rock mass classification systems, laboratory testing as well as empirical approaches for rock mass strength determination. Conducting a statistical analysis, a representative rock mass strength was estimated. The assessed rock mass strength gives a good indication for the stability of the underground mining panel and can be used as input parameter for numerical simulation.

Keywords: Rock mechanics, Underground mining, Rock mass classification, Rock mass strength

1. Einleitung

Wie in allen Industriesparten ist es auch im Bergbau entscheidend, die Produktion so effektiv wie möglich zu gestalten und gleichzeitig das Arbeitsrisiko zu minimieren. Insbesondere im untertägigen Bergbau tritt diese Herausforderung immer weiter in den Vordergrund, wenn die Abbautätigkeiten in größere Teufen vordringen, unter komplexen geologischen Bedingungen erfolgen oder die Rahmenbedingungen von den gewohnten Umständen abweichen. Hier stellt das Wissen über das Verhalten des Gebirges bei der Erstellung von untertägigen Hohlräumen einen der wichtigsten Einflussfaktoren für Arbeitssicherheit, Produktivität und Einfluss der Bergbauaktivitäten auf die Tagesoberfläche dar. Eine auf die Gebirgsverhältnisse optimierte Abbauplanung ist daher der Schlüssel für den sicheren und effizienten Abbau von Wertmaterial. Um das Verhalten des Gebirges im Zuge der Abbautätigkeiten beschreiben und vorhersagen zu können, müssen dessen Eigenschaften bestimmt werden, wobei die Festigkeitseigenschaften des Gebirges in Bezug auf Hohlraum- und Systemstabilität eine wesentliche Rolle spielen. Die Beschreibung der Gebirgseigenschaften kann durch eine geotechnische Beurteilung erfolgen, deren Durchführung, Anwendung und Problematik im Rahmen der vorliegenden Arbeit erläutert und diskutiert werden.

2. Durchführung der geotechnischen Beurteilung

Zur Beurteilung des Gebirges wurden in einem ersten Schritt jene Gebirgseigenschaften beschrieben, die das Verhalten des Gebirges bei der bergmännischen Gewinnung von Rohstoffen wesentlich beeinflussen. Hier kommt der Gebirgsfestigkeit große Bedeutung zu, da es bei Überschreiten der Gebirgsfestigkeit zu Bruchvorgängen im Gebirge kommt, welche erhebliche Auswirkungen auf die

Dipl.-Ing. S. Schinagl (✉)
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
Department Mineral Resources Engineering,
Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Straße 18,
8700 Leoben, Österreich
sebastian.schinagl@unileoben.ac.at

Abb. 1: Vom Gestein zum Gebirge, nach [1]

Stabilität des Grubengebäudes und somit die Arbeitssicherheit haben können. In Bezug auf die Gebirgsfestigkeit sind hier die Scherfestigkeit von Diskontinuitäten, der Zerlegungsgrad des Gebirges und die Gesteinsfestigkeit entscheidend. Die Gesteinsfestigkeit kann durch einfache Laborversuche bestimmt werden, während die anderen beiden Faktoren deutlich aufwendiger mithilfe von Bewertungssystemen abgeschätzt werden müssen.

Hier muss auch auf den Unterschied zwischen Gestein und Gebirge hingewiesen werden. Gesteinsmaterial beschreibt das intakte Gestein, das im Gebirge zwischen Trennflächen vorgefunden werden kann (Abb. 1; [1]).

2.1 Gesteinsfestigkeit

Für die Beurteilung der Stabilität von untertägigen Hohlräumen wird in den meisten Fällen die einaxiale Druckfestigkeit, UCS („Uniaxial Compressive Strength“) von Gesteinen in Betracht gezogen. Die einaxiale Druckfestigkeit ist eine Materialeigenschaft, welche die maximale Druckspannung bezeichnet, die ein Gestein aufnehmen kann, bevor das Versagen eintritt. Zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit wird der einaxiale Druckversuch herangezogen. Durchgeführt wird dieser an zylindrischen Gesteinsproben. Dazu wird der Prüfkörper in einer hydraulischen Presse ohne seitliche Einspannung bis zum Bruch und darüber hinaus belastet. Zusätzlich können die Art des Bruches sowie das Verhalten der Probe nach dem Bruch von Bedeutung für die geotechnische Beurteilung sein.

2.2 Gebirgsfestigkeit

Die Gebirgsfestigkeit, also der Widerstand des Gebirgsverbandes gegen auftretende Belastungen, setzt sich aus den mechanischen Eigenschaften der das Gebirge aufbauenden Bestandteile sowie deren Interaktion zusammen. Hier kommt einerseits der Festigkeit der Gesteinsmaterialien sowie dem Verhalten der im Gebirge vorhandenen Trennflächen große Bedeutung zu. Die Untersuchung von Diskon-

tinuitäten stellt in der Gebirgsmechanik, noch vor der Gesteinsfestigkeit, den wichtigsten Faktor zur Beschreibung eines Gebirges dar [2]. Neben den Festigkeitseigenschaften der Diskontinuitäten sind auch deren Anzahl und Orientierung (Zerlegungsgrad) maßgeblich für die Gebirgsfestigkeit. Problematisch ist in diesem Zusammenhang, dass all diese Parameter nur schwer zu quantifizieren sind.

Zur Beurteilung der Gesteinseigenschaften, insbesondere der Festigkeit des Gesamtverbandes „Gebirge“, müssen die Eigenschaften aller das Gebirge aufbauenden Komponenten und deren Interaktion berücksichtigt werden. Zu diesem Zwecke wurden einige Verfahren entwickelt, welche unter der Bezeichnung „Gebirgsklassifikation“ geläufig sind. Diese Verfahren sind empirische Methoden, welche die relevanten Gebirgscharakteristika beschreiben und bewerten. Auf Basis der Bewertung des Gebirges wurden in weiterer Folge Ansätze zur Berechnung einer für das Gesamtsystem Gebirge repräsentativen Festigkeit entwickelt [4, 7]. Im Rahmen der gegenständlichen Diplomarbeit wurden die in der Literatur geläufigsten Verfahren zur Gebirgsklassifikation und Gebirgsfestigkeitsbestimmung angewandt und diskutiert. Im folgenden Abschnitt wird daher kurz auf die unterschiedlichen Verfahren eingegangen.

3. Gebirgsklassifikation

Die Verfahren zur Gebirgsklassifikation stellen eine Möglichkeit dar, geologisch-qualitative Beschreibungen von Gebirgseigenschaften in eine quantitative Bewertung zu konvertieren. Es existieren eine Vielzahl von Bewertungssystemen, wovon unter anderem das „Rock Mass Rating (RMR)“ nach Bieniawski [3], das „Mining Rock Mass Rating (MRMR)“ nach Laubscher [4] und das „Q-System“ nach Barton [4] in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Keines der genannten Systeme wurde ursprünglich zur Berechnung einer Gebirgsfestigkeit entwickelt, sondern zur Ermittlung von Ausbauklassen (Bieniawski und Barton), also einer Empfehlung für adäquate Sicherheitsmaßnahmen im jeweiligen Anwendungsfall, oder zur Dimensionierung von Blockbruchbauten (Laubscher). Das System „Rock Qua-

lity Designation (RQD)“ nach Deere bewertet ausschließlich den Trennflächenabstand und ist daher kein vollwertiges Klassifikationssystem [3, 4].

Der GSI nach Hoek beurteilt das Gebirgsgefüge anhand von Charts, wobei es unterschiedliche Charts für intaktes, relativ homogenes Gebirge und auch für heterogene Gebirgsverhältnisse gibt [5]. Als einziges Bewertungssystem dient es primär der Ermittlung der Gebirgsfestigkeit.

Bei genauerer Betrachtung des Aufbaus der Klassifikationsverfahren zeigt sich, dass der Abstand und der Zustand der Diskontinuitäten (für die Scherfestigkeit maßgeblich) die einflussreichsten Parameter für die Gebirgsklassifikation darstellen.

Auch wenn die Verfahren zur Gebirgsklassifikation ursprünglich nicht rein der Bestimmung der Gebirgsfestigkeit dienten, wurden im Laufe der Zeit empirische Ansätze zur Berechnung der Gebirgsfestigkeit auf Basis aller erwähnten Klassifikationsverfahren entwickelt. Nachfolgend wird auf die Bestimmung der Gebirgsfestigkeit auf Basis dieser Gebirgsklassifikationsverfahren eingegangen.

4. Ermittlung der Gebirgsfestigkeit

Die Gebirgsfestigkeit beschreibt, analog zur Gesteinsfestigkeit, die maximal mögliche Druckspannung, die ein Gebirge aufnehmen kann. Durch die zuvor beschriebenen Faktoren ist die Gebirgsfestigkeit gegenüber der Gesteinsfestigkeit verringert.

Die Standfestigkeit von untertägigen Hohlräumen muss von der Gebirgsfestigkeit abgegrenzt werden. Für die Standfestigkeit sind insbesondere die Lage und die Dimension des aufgefahrenen Hohlraums von Bedeutung (Systemeigenschaft), vor allem in Bezug auf die Orientierung von signifikanten geologischen Charakteristika, wie Trennflächen, während die Gebirgsfestigkeit eine reine Materialeigenschaft ist.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden viele empirische Ansätze zur Abschätzung der Gebirgsfestigkeit veröffentlicht. Der Begriff Abschätzung wird hier dem Ausdruck „Bestimmung“ vorgezogen, da der Grad der Unsicherheit bei natürlich entstandenen Materialien wesentlich höher liegt als bei künstlichen Werkstoffen. Die Abschätzung der Gebirgsfestigkeit mithilfe einer Gebirgsklassifikation erfolgt meist in der Form

$$\sigma_{\text{Gebirge}} = \sigma_{\text{Gestein}} * f(\text{Ergebnis der Klassifikation})$$

Alternativ kann die Gebirgsfestigkeit auch durch Großversuche, durch Rückrechnung von Versagensfällen oder durch ein Versagenskriterium ermittelt werden [6]. In dieser Arbeit wurde auf die Betrachtung und Anwendung alternativer Methoden verzichtet, da Großversuche wirtschaftlich uninteressant waren und für die Rückrechnung auf Basis von Versagensfällen keine verwertbaren Grundlagen zur Verfügung standen.

Zur Abschätzung der Gebirgsfestigkeit wurden die Verfahren nach Hoek, Ramamurthy, Barton, Trueman und Laubscher verwendet [7]. Diese Verfahren beziehen sich auf die Ergebnisse unterschiedlicher Klassifikationssysteme.

Somit konnten die Ergebnisse aller Klassifikationsverfahren zur Abschätzung der Gebirgsfestigkeit herangezogen und ein Vergleich zwischen den Ergebnissen angestellt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurde für die Abschätzung der Gebirgsfestigkeit auf bereits bestehende Daten aus Gebirgsaufnahmen und Anwendung von Gebirgsklassifikation zurückgegriffen. Im Zentrum stand die Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten und die Berechnung einer repräsentativen Festigkeit für das betroffene Abbaurevier.

Grundsätzlich wird bei der Anwendung von Gebirgsdokumentation und Gebirgsklassifikation das Gebirge in Abschnitte unterteilt, um Zonen niedriger und höherer Gebirgsqualität detektieren zu können. Als zusätzliche Eingangsparameter für die Auswertungen und Analysen konnte auf 80 m Bohrkerne aus 14 Bohrlöchern zurückgegriffen werden.

Bei der Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten und der Berechnung einer für das Abbaurevier repräsentativen Gebirgsfestigkeit wurden einige Schwierigkeiten angetroffen, welche im folgenden Abschnitt beschrieben werden. Kritisch waren in erster Linie die geringe Übereinstimmung der einzelnen Verfahren, sowie die komplexe Natur des tektonisch beeinträchtigten Mineralkörpers.

4.1 Probleme durch Inhomogenität des Gebirges

Im Falle von sehr inhomogenem Gebirge stellt die Bestimmung von einem für größere Bereiche repräsentativen Festigkeitswert, der die Eigenschaften des gesamten Gebirgsbereiches beschreiben soll, eine erhebliche Schwierigkeit dar. Stark variierende Gesteinsfestigkeiten sowie ein stark variierender Zerlegungsgrad des Gebirges aufgrund von Stör- und Schwächezonen im betrachteten Gebirgsabschnitt führen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen der Gebirgsfestigkeit je nach Abschnitt. In Bezug auf die Eingangsparameter für die Abschätzung der Gebirgsfestigkeit betrifft dies neben den visuellen geotechnischen Aufnahmen die Messwerte einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (UCS) und den Rock Quality Designation Faktor (RQD), der den natürlichen Zerlegungsgrad des Gebirges beschreibt und wie die UCS einen Eingangsparameter für die Gebirgsklassifikation und in weiterer Folge auch Gebirgsfestigkeitsberechnung darstellt. Die Berechnung der Gebirgsfestigkeit auf Basis der stark variierenden Gebirgseigenschaften führte dazu, dass keine Gebirgsfestigkeit für das Abbaurevier abgeschätzt werden konnte. Aufgrund der Inhomogenität des Gebirges wäre es nämlich falsch anzunehmen, dass die Festigkeitseigenschaften eines einzelnen Bohrloches repräsentativ für einen Abschnitt sind, geschweige denn repräsentativ für Abschnitte, die 30 oder mehr Meter vom Bohrloch entfernt sind. Aus diesem Grund wurde die abschnittsweise Darstellung zugunsten einer statistischen Analyse des gesamten zu beurteilenden Abbaubereiches geändert, welche im folgenden Abschnitt erläutert wird.

4.2 Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Gebirgsfestigkeit

Die Notwendigkeit einer statistischen Auswertung ergab sich durch die große Varianz der Gebirgsaufnahmen und der Bohrlochdaten. Es wurden nur in neun Abschnitten Kernbohrungen durchgeführt, die Gebirgsaufnahmen umfassen jedoch 41 Abschnitte im Abbaubereich. Bei der alleinigen Verwendung der Abschnitte, in denen gebohrt wurde, würde so ein Großteil der Daten (aus den Gebirgsaufnahmen) nicht weiter verwendet werden. Hinzu kommt die große Streuung der Druckfestigkeiten und RQD-Werte entlang eines Bohrlochs. Dies führt zu einer großen Unsicherheit in den Eingangsdaten. Die in diesem Abschnitt präsentierte stochastische Methode der Monte-Carlo-Simulation soll die Unsicherheit in der Auswertung verringern.

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein Oberbegriff für mehrere numerische Methoden, „die Zufallszahlen zur approximativen Lösung oder zur Simulation verschiedener Prozesse einsetzen“ [8].

Bei einer Monte-Carlo-Simulation werden die Verteilungen jedes Einflussfaktors miteinander verknüpft. So können auch einzelne Messwerte aus Abschnitten, die aufgrund fehlender restlicher Messergebnisse normalerweise nicht zum Ergebnis beitragen, verwendet werden. Liegen sehr viele Messwerte vor und bilden diese eine bekannte Verteilungsfunktion ab (Normal- oder Gammaverteilung, ...), so kann auch diese Verteilungsfunktion anstatt einer diskreten Zufallsverteilung herangezogen werden. Im vorliegenden Fall wurde jedoch für jeden Einflussfaktor die originale Verteilung „gestreckt“. So werden aus 80 realen Ergebnissen beispielsweise 1000 fiktive Ergebnisse erzeugt, die in zufälliger Reihenfolge vorliegen, jedoch die originale Verteilung aufweisen. Eine hohe Anzahl an Zufallszahlen verbessert dabei die Genauigkeit der Analyse [8].

In der vorliegenden Arbeit handelt es sich bei den variierten Parametern um den Diskontinuitätszustand und -abstand, den RQD sowie die einaxiale Druckfestigkeit. Werden aus den diskret zufallsverteilten Parametern zeilenweise die Ergebnisse zur Gebirgsfestigkeit berechnet, ergibt sich die Darstellung in Abb. 2 rechts. Nachteilig ist der Verlust von Korrelationen von Parametern, was zur Verfälschung des Ergebnisses führen kann. Besteht also ein Zusammenhang

zwischen Parametern, so sollte dieser auch in der Zufallszahlenerzeugung inkludiert sein.

Die Abb. 2 zeigt im Vergleich ein Beispiel der Gebirgsklassifikation nach Bieniawski und der Gebirgsfestigkeitsbestimmung nach Ramamurthy und soll so Einblick in die durchgeführte Analyse geben.

Die simulierte mittlere Gebirgsfestigkeit beträgt für das hier angeführte Beispiel 19,3 MPa, bei einer Standardabweichung von 10 MPa. Wird hingegen nur der Mittelwert aus allen Einflussparametern herangezogen, so ergibt sich eine durchschnittliche Gebirgsfestigkeit von 17,1 MPa, sowie 20,3 MPa, wenn nur vollständig gemessene Abschnitte herangezogen werden. Die Berücksichtigung aller vorhandenen Daten in die stochastische Simulation stellt hierbei den größten Vorteil dieser Methode dar. Im Vergleich zum reinen Mittelwert ist somit eine Verteilung der Ergebnisse ersichtlich, was auch die Anwendung einer Risikoanalyse erleichtert.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den in Tabelle und Diagramm ersichtlichen Werten nicht um reale Zahlenwerte aus der Arbeit handelt.

5. Schlussfolgerung

Die Durchführung von Gebirgsklassifikationen und die Ermittlung der Gebirgsfestigkeit sind in inhomogenen Gebirgen mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Die einzelnen visuellen Aufnahmen gelten nur für sehr kleine Abschnitte („Homogenbereiche“) und die vielen notwendigen Bohrkernuntersuchungen zur Bestimmung der Gesteinsfestigkeit führen zu hohen Kosten.

Eine stochastische Simulation stellt hier einen Ausweg dar. Allerdings ist so nur eine Gesamtbetrachtung möglich, eine Zuordnung einzelner Abschnitte geht verloren. Sind die einzelnen Gebirgsparameter voneinander unabhängig, so kann die Simulation einfach mithilfe der diskreten Verteilung der einzelnen Gebirgsparameter ablaufen.

Aus den verwendeten Verfahren stellten sich die Gebirgsfestigkeitsermittlungen nach Hoek und die Gebirgsklassifikation nach Bieniawski als am besten geeignet heraus. Die Begründung liegt in der objektiven Methodik der beiden Verfahren, die darüber hinaus jeweils umfangreiche Datenbasen zur Entwicklung der Systeme als Grund-

Abb. 2: Links – Eingangsparameter und Ergebnisse der Gebirgsfestigkeitsbestimmung, rechts – geordnete Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation

lage zur Verfügung hatten. Die Abschätzung der Gebirgsfestigkeit aus der einaxialen Druckfestigkeit nach [9] und [10] lässt auf eine realitätsnahe Simulation schließen. Das Ergebnis aus der Monte-Carlo-Simulation ist gegenüber einem Einzelergebnis (gewöhnliche Mittelwertbildung) von Vorteil, da sie eine bessere Risikoabschätzung erlaubt. Eine Methode, die Abhängigkeiten zwischen den Parametern in der Zufallszahlenerstellung berücksichtigt, würde die Qualität der Analyse noch weiter verbessern.

Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) 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.

Literatur

1. Brady, B. H. G.; Brown, E. T.: Rock Mechanics for underground mining, 3rd edition, Springer Science, 2005.
2. Hudson, J. A.; Harrison, J. P., Engineering rock mechanics – an introduction to the principles, Elsevier Science Ltd, 1997
3. Bieniawski, Z. T.: Engineering rock mass classifications, Wiley Inter-science, 1989
4. Siefert, M.: Verfahren zur qualitativen und quantitativen Beschreibung des Gebirges, 1. Teil: Qualitative Gebirgsbeschreibung, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 154 (2009), S. 272–286
5. Marinos, P.; Hoek, E.: GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation, ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics, 2005
6. Krauland, N.; Söder, P.E.; Agmalm, G.: Determination of rock mass strength by rock mass classification – some experiences and questions from Boliden Mines, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 26 (1989), iss. 1, p. 115–123
7. Siefert, M.: Verfahren zur qualitativen und quantitativen Beschreibung des Gebirges, 2. Teil: Quantitative Gebirgsbeschreibung, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 154 (2009), S. 426–440
8. Theis, C.; Kernbichler, W.: Grundlagen der Monte Carlo Methoden, TU Graz, 2002
9. Cai, M.; Kaiser, P.K.; Uno, H.; Tasaka, Y.; Minami M.: Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 41 (2004), iss.1, p. 3–19
10. Jager, A. J.; Ryder J. A.: A handbook on rock engineering practice for tubular hard rock mines, The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC), 1999