BHM (2017) Vol. 162 (10): 475–479

DOI 10.1007/s00501-017-0637-0

© Der/die Autor(en) 2017.

Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Gebirgsmechanische Herausforderungen des tiefen Bergbaus

Horst Wagner

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

Eingegangen 3. Juli 2017; angenommen 3. Juli 2017; online publiziert 18. Juli 2017

Zusammenfassung: Der Beitrag behandelt die besonderen gebirgsmechanischen Probleme des tiefen Bergbaus. Diese sind der begrenzte Informationsstand zum Planungszeitpunkt betreffend die Lagerstätte, die Geologie, den In situ-Spannungszustand und die Gebirgseigenschaften. Der Einfluss der Diskontinuitäten auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften wird dargestellt. Ein wesentlicher Aspekt des tiefen Bergbaus sind die durch den Abbau verursachten Spannungsumlagerungen im Gebirge. Diese werden am Beispiel plattenförmiger Lagerstätten dargestellt. Im tiefen Bergbau werden die wichtigen Grubenbaue bevorzugt in druckentspannte Bereiche gelegt. Die Vorgehensweise bei der Planung der Infrastrukturbaue wird gezeigt. Die Auswirkungen der hohen Umschlingungsdrücke auf die Bruchvorgänge im Alten Mann werden angesprochen. Der letzte Abschnitt befasst sich mit den Anforderungen an den Ausbau in tiefen Bergwerken.

Schlüsselwörter: Gebirgsdruck, Gebirgsspannungen, Spannungsumlagerungen, Gebirgseigenschaften, Bruchvorgänge, Infrastrukturplanung, Ausbauanforderungen

Rock Mechanics Challenges in Deep Mines

Abstract: The paper addresses rock mechanics issues specific to deep mines. Amongst these are the limited information available at the planning stage concerning the ore body geology, the in situ stress situation and the rock mass properties. The effects of discontinuities on rock mass strength and deformation are shown. An important feature of deep mining is the stress change resulting from major stooping operations. This is illustrated for tabular stopes. Where possible, important infrastructure development is placed in de-stressed regions. The effects of high confining stresses

on caving operations are discussed. The final chapter deals with rock reinforcement.

Keywords: Rock pressure, Rock stress, Stress changes, Rock mass properties, Rock fracturing, Infrastructure design, Rock reinforcement

1. Einleitung

Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen ist eng mit der globalen wirtschaftlichen Entwicklung verbunden. Konservative Prognosen deuten darauf hin, dass sich der jährliche Rohstoffbedarf bis 2050 mehr als verdoppeln wird. Mit der Erschöpfung oberflächennaher Rohstoffvorkommen entwickelt sich die Rohstoffgewinnung in Richtung größerer Teufen. Bereits heute wird Eisenerz in Schweden und in der Ukraine in Teufen von mehr als 1 km gewonnen. Der polnische Kupferschieferbergbau hat eine Teufe von 1,2 km überschritten. Nickelerz in Kanada wird in Teufen von mehr als 2 km abgebaut. In Österreich beträgt die Mächtigkeit der Überlagerung im Scheelitbergbau Mittersill mehr als 1 km und im Magnesitbergbau Breitenau nahezu 1 km. Damit einhergehend sind zahlreiche Gebirgsdruckprobleme. Diese reichen von größeren Druckerscheinungen in Strecken, Rampen und Schächten zu Versagen von Bergfesten bis hin zu Gebirgsschlägen. Es ist daher geboten, sich mit der Frage der Gebirgsdruckprobleme im tiefen Bergbau näher auseinander zu setzen.

2. Natur der Gebirgsdruckproblematik in tiefen Bergwerken

Die wesentliche Ursache der Gebirgsdruckprobleme in tiefen Bergwerken ist die Zunahme der Spannungen im Gebirge mit der Mächtigkeit der Überlagerung. In Gebieten mit horizontaler Tagesoberfläche nimmt die vertikale Spannungskomponente, σ_v , mehr oder weniger proportional mit der Überlagerungshöhe zu. Die Größe der horizontalen Spannungskomponenten, σ_x und σ_y , kann nicht auf

Em. Univ.-Prof. Dr. H. Wagner (✉)
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
Montanuniversität Leoben,
Erzherzog-Johann-Str. 3,
8700 Leoben, Österreich
horst.wagner@unileoben.ac.at

einfache Weise vorhergesagt werden. Üblicherweise wird die horizontale Gebirgsspannung durch das Spannungsverhältnis k ausgedrückt:

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (1)$$

Die untere Grenze des Spannungsverhältnisses k liegt bei etwa 0,3 und wird durch die Querdehnungszahl des Gebirges bestimmt, während die obere Grenze stark teufenabhängig ist und durch folgende Beziehung beschrieben werden kann [1]:

$$k_{\text{oberer Grenzwert}} = 0,3 + \frac{1500}{z} \quad (2)$$

Wobei z die Überlagerungshöhe in Meter ist.

Aus (2) folgt, dass im Falle geringer Überlagerungshöhe $\sigma_h > 3\sigma_v$ sein kann, während in großen Teufen die horizontale Gebirgsspannung $\sigma_h < 1$ ist.

Im alpinen Bereich ist die Beurteilung der primären Gebirgsspannungen infolge der alpinen Tektonik und der unregelmäßigen Topographie wesentlich schwieriger und kann im Allgemeinen nur messtechnisch bestimmt werden. Insbesondere in „V“-Tälern mit hohen und steilen Flanken können unterhalb der Talsohle hohe horizontale Spannungen auftreten.

In größeren Teufen sind die im Gebirge herrschenden Spannungen oft so hoch, dass Gebirgsfestigkeit in der Umgebung der Hohlräume überschritten wird und ausgeprägte Bruchzonen entstehen. Diese können nur durch aufwändige Ausbaumaßnahmen beherrscht werden. Die hohen Gebirgsspannungen stellen auch Grenzen für den Einsatz von festenartigen Abbauverfahren dar. Ein zweiter und weniger beachteter Effekt der hohen Gebirgsspannungen ist deren Auswirkung auf das Verhalten des Gebirges beim Bruchbau. Durch die hohen Druckspannungen im Alten Mann (Bruchraum) kommt es infolge der hohen Reibungskräfte im Bruchbereich zur Brückenbildung, die das planmäßige Verbrechen des Gebirges verhindern kann. Die dritte negative Auswirkung hoher Gebirgsspannungen sind die Gebirgsschläge. Diese sind instabile Bruchvorgänge, bei denen große Energiebeträge mit hohem Schadenpotential schlagartig frei gesetzt werden.

Voraussetzung für eine sichere und wirtschaftliche Gewinnung tiefer Rohstoffvorkommen ist die Beherrschung des Gebirgsdruckproblems. Dies erfordert eine sorgsame gebirgsmechanische Planung, die Wahl geeigneter Abbauverfahren, den richtigen Ausbau sowie eine kontinuierliche Beobachtung und Interpretation der Gebirgsdruckauswirkungen.

3. Gebirgsmechanische Planung

3.1 Eingangparameter für die gebirgsmechanische Planung

Voraussetzungen für eine erfolgreiche gebirgsmechanische Planung sind eine gute Kenntnis der geologischen Verhältnisse, der Form, Größe und Inhaltsverteilung der Lagerstätte, der Störungssysteme, des In situ-Spannungszustandes

sowie der geomechanischen Eigenschaften des Gebirges. Im Falle tiefer Rohstoffvorkommen sind die für die Planung erforderlichen Informationen vielfach nicht oder nur unvollständig vorhanden. Dies gilt insbesondere für die geomechanischen Eigenschaften des Gebirges.

In den vergangenen 40 Jahren wurde eine Reihe von empirischen Gebirgsklassifikationsverfahren entwickelt, die alle zum Ziel haben, Aussagen über das zu erwartende Gebirgsverhalten zu machen. Die bekanntesten Verfahren sind das RMR-Verfahren von Bieniawski [2, 3], das Q-Verfahren von Barton [4], das MRMR-Verfahren von Laubscher [5, 6]. Diese Verfahren versuchen in unterschiedlicher Weise den Einfluss der im Gebirge vorhandenen Diskontinuitäten auf das Gebirgsverhalten mit Hilfe einer Kennzahl, RMR-Wert, Q-Wert oder MRMR-Wert zu beschreiben. Eingangswerte sind der RQD-Wert, die Zahl der Kluftsysteme, der Kluftabstand und der Kluftzustand sowie die Gesteinsfestigkeit. Auf die Details dieser Verfahren wird nicht näher eingegangen, da sie in der Literatur gut dokumentiert sind.

Auf der Grundlage der genannten Kennwerte wurde eine Reihe von empirischen Formeln zur Beurteilung der Gebirgsfestigkeit und des Verformungsverhaltens des Gebirges entwickelt. Abb. 1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Formeln und zeigt den Zusammenhang zwischen den Gebirgskennwerten und der mit der Labor-Druckfestigkeit der verschiedenen Gesteine normierten Gebirgsdruckfestigkeit. Von besonderer Bedeutung sind die Daten betreffend die Bergfesten, da die Belastung der Bergfesten mit hoher Zuverlässigkeit bestimmt werden kann. Im Bereich niedriger Gebirgskennwerte, hier handelt es sich um ein stark geklüftetes Gebirge mit ungünstigen Trennflächeneigenschaften, kann die Gebirgsdruckfestigkeit weniger als 20 % der Gesteinsdruckfestigkeit sein. Erst in einem weitgehend ungeklüfteten Gebirge überschreitet die Gebirgsfestigkeit 70 % der Gesteinsfestigkeit.

Abb. 1: Zusammenhang zwischen den Kennwerten RMR, GSI und Q und der normalisierten Gebirgsdruckfestigkeit [9]

Abb. 2: Zusammenhang zwischen dem normalisierten In situ-Verformungsmodul des Gebirges und dem GSI-Wert, nach [10]

Die Bestimmung der dreiaxialen Gebirgsdruckfestigkeit erfolgt meist auf der Basis des allgemeinen Hoek-Brown Bruchkriteriums [7, 8]. Das Bruchkriterium von Hoek und Brown wurde für die erste Abschätzung der Festigkeit eines ungeklüfteten und eines durch zahlreiche Kluftscharen durchtrennten quasi isotropen Gebirges entwickelt. Es ist daher für die Bestimmung der Festigkeit von Gebirge mit wenigen, dominanten Diskontinuitätsflächen nicht geeignet. Dieser Aspekt wird häufig ignoriert.

Der Einfluss des Gebirgskennwerts auf den Verformungsmodul des Gebirges geht aus Abb. 2 hervor. Der generelle Trend ist ähnlich jenem der Gebirgsfestigkeit. Im Falle des Verformungsmoduls des Gebirges gilt, dass dieser spannungsabhängig ist und insbesondere im Bereich niedriger Gebirgskennwerte mit der Spannung zunimmt.

3.2 Gesichtspunkte für die Planung der Bergbauinfrastruktur

Voraussetzung für den langen ungestörten Betrieb tiefer Bergwerke ist eine standfeste Bergbauinfrastruktur, d. h. Schächte, Hauptstrecken, Querschläge, Füllörter, Pumpenkammern etc. Die gebirgsmechanische Planung der erforderlichen Infrastruktur hat auf der Grundlage der langfristigen abbaubedingten Spannungsumlagerungen zu erfolgen. Daraus folgt, dass bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt Klarheit über das Abbauverfahren, den Zuschnitt der Abbaubereiche und die Abbaureihenfolge bestehen muss. Darauf aufbauend kann die Spannungssituation im Bereich der Infrastrukturbauwerke bestimmt werden.

Im ultratiefen Bergbau ist es üblich, die Bergbauinfrastruktur, soweit möglich, in druckentspannten Bereichen aufzufahren. Abb. 3 zeigt eine beim Abbau tiefer plattenförmiger Lagerstätten typische Spannungsverteilung. Vor dem Abbaustoß befindet sich der Bereich hoher Druckspannungen, hinter dem Abbaustoß im abgebauten Bereich ist das Gebirge weitgehend druckentlastet. In diesem Bereich befinden sich z. B. die Abbaustrecken, die dem Abbau nachgeführt werden. Der Zugang zum Abbau erfolgt durch kurze

Abb. 3: Spannungssituation um einen tiefen plattenförmigen Abbauhohlraum [12]

Querschläge und Aufhauen. Schrägschächte werden im Allgemeinen auch im druckentspannten Bereich aufgefahren. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, in Teufen von mehreren tausend Metern Strecken in einem Spannungsumfeld, das einer Teufe von weniger als fünfhundert Metern entspricht, aufzufahren. Seit etwa 1980 ist man im tiefen Goldbergbau auch vom traditionellen Konzept des Schutzes der Hauptschächte durch Schachtsicherheitsfesten abgegangen und beginnt mit dem Abbau der Lagerstätte in unmittelbarer Umgebung des Schachtes, um diesen und zahlreiche Grubenbaue in der Umgebung des Schachtes zu entspannen [11]. Der tiefe Bergbau erfordert ein vollständiges Umdenken.

Die gebirgsmechanische Planung der Bergbauinfrastruktur erfordert einerseits die Kenntnis der über die Lebensdauer des Grubenbaus auftretenden Spannungen und andererseits ein Kriterium zur Beurteilung der Auswirkungen der Spannungen auf den Grubenbau. Dieses könnte einerseits die Gesteins- oder besser Gebirgsfestigkeit sein oder ein semi-empirisches Kriterium, welches auch Aussagen über den Einfluss des Ausbaus auf den Grubenbau erlaubt. Ein derartiges Kriterium ist der „Rock Wall Condition (RCF) Faktor“. Dieser beschreibt den Streckenzustand in Abhängigkeit von der regionalen Spannung im Streckenbereich, der Gesteinsfestigkeit und des eingesetzten Ausbaus,

$$RCF = \frac{3\sigma_1 - \sigma_3}{F \cdot \sigma_c} \quad (3)$$

wobei σ_1 und σ_3 die Hauptspannungen im Bereich des Grubenbaus sind und σ_c die einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit ist. F ist der Festigkeitsreduktionsfaktor. Dieser hat im Falle von einem sehr massivem Festgestein den Wert 1, in leicht geklüftetem Gebirge 0,75 und in stärker geklüftetem Gebirge 0,5 [13]. Der Zusammenhang RCF-Faktor und Hohlraumzustand geht aus Abb. 4 hervor. Aus der Abbildung folgt, dass sich im Fall von nicht ausgebauten Strecken deren Zustand rasch verschlechtert, wenn der RCF-Wert kleiner als 0,7 wird. Mit entsprechendem Ausbau können gute Streckenverhältnisse auch bei höheren RCF-Werten gewährleis-

Abb. 4: Zusammenhang zwischen Hohlraumzustand, RCF-Faktor und Ausbau [14]

tet werden. Das aus dem Goldbergbau stammende RCF-Konzept wurde mit Erfolg auch im tiefen österreichischen Bergbau angewendet [14].

3.3 Gesichtspunkte bei der Wahl des Ausbaus

Auf die Entstehung von Bruchzonen um Hohlräume in tiefen Bergwerken wurde bereits hingewiesen. Der Wahl geeigneter Ausbausysteme kommt im tiefen Bergbau besondere Bedeutung zu. Mit der Einführung von Ankerausbau in der Mitte des 20. Jahrhunderts hat im Bergbau eine entscheidende Wende vom traditionellen Unterstützungsausbaue (Türstock, Holzstempel, Stahlbogen) zum Gebirgsverfestigungsausbaue (rock reinforcement) stattgefunden. Das moderne Ausbausystem im tiefen Bergbau besteht darin, die Eigentragsfähigkeit des gebrochenen Gebirges im Hohlraumbereich zu erhöhen. Dies geschieht durch Schaffung eines dreiaxialen Druckspannungszustands um den Hohlraum und die Vermeidung bzw. Verringerung der Gebirgsauflockerung durch vorgespannte Gebirgsanker und wo erforderlich, die Schaffung eines Ausbauverbundsystems mit hoher Biegezugfestigkeit durch Integration der Gebirgsanker mit Drahtnetzen und Geflechten und gegebenenfalls auch Spritzbeton. Mit Hilfe derartiger Ausbausysteme ist es möglich geworden, Grubenbaue auch unter extremen Gebirgsdrucksituationen offen und gebrauchsfähig zu halten [14]. Ein Bereich, der noch Verbesserungspotential hat, ist das begrenzte Energieaufnahmevermögen der Gebirgsanker.

3.4 Abbaufverfahren

Festenartige Abbaufverfahren finden im tiefen Bergbau nur begrenzte Anwendung und erfordern infolge der hohen Belastungen und des Gebirgsschlagpotentials besondere Aufmerksamkeit. Soweit möglich soll die Abbaureihenfolge so geplant und durchgeführt werden, dass die Festen hinter der Abbaufont entstehen und nicht in oder vor der Front. Insgesamt gilt, dass die Abbauplanung und Reihenfolge im tiefen Bergbau wesentlich kritischer zu betrachten ist als beim Abbau in geringer Teufe. Die Entwicklung von Restfes-

tensituationen muss vermieden werden, da diese ein sehr großes Gebirgsschlagrisiko darstellen.

4. Schlussfolgerungen

Infolge der begrenzten Informationen zum Planungszeitpunkt betreffend die Geologie und die Gebirgseigenschaften besteht beim tiefen Bergbau ein hohes Risikopotential. Dementsprechend ist die Bergbauplanung flexibel zu gestalten und Alternativen sind mit einzuplanen. Entscheidend für den Langzeiterfolg tiefer Bergbauaktivitäten ist eine systematische Erfassung der bergbaubedingten Veränderungen des Gebirgsverhaltens und im ultratiefen Bergbau auch die systematische Erfassung und Auswertung von Gebirgsdeformationen und der seismischen Aktivitäten.

Acknowledgements. 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

- Brady, B. H. G.; Brown, E. T.: Rock mechanics for underground mining, 3rd Ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004
- Bieniawski, Z. T.: Rock mass classification in rock engineering, in: Symposium on Exploration for Rock Engineering, Cape Town: Balkema, 1976. Vol. 1, pp. 97–106
- Bieniawski, Z. T.: Rock mass classification in rock engineering, in: Bieniawski, Z. T. (ed) Exploration for Rock Engineering, A.A. Balkema, Capetown, vol. 1, 1976, pp. 97–106.
- Barton, N. R.; Lien, R.; Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics 6 (1974), pp. 189–239
- Laubscher, D. H. (1990): A geomechanics classification system for the rating of rock masses in mine design, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 90 (1990), pp. 257–273
- Laubscher, D. H.; Jakubec, J.: The MRMR rock mass classification for jointed rock masses, in: W.A. Hustrulid and R.L. Bullock (eds): Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, Colorado, 2001, pp. 475–481
- Hoek, E. and Brown, E. T.: The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update, in: Proc. 15th Rock Mech. Symp., Toronto: Dept. Civ. Eng., University of Toronto, 1988, pp. 31–38
- Hoek, E.; Brown, E. T.: Practical estimates of rock mass strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 34 (1997), pp. 1165–1186
- Hoek, E.: Discussion paper: Estimates of rock mass strength, <http://www.rocscience.com> (April 2004)
- Hoek, E.; Diederichs, M.: Empirical estimates of rock mass modules, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43 (2006), pp. 203–211
- Wagner, H.; Salamon, M. D. G.: Strata control techniques in shafts and large excavations, in: Assoc. of Mine Managers of South Africa, Papers and Discussions, 1972–73, pp. 123–140
- Wagner, H.: Protection of service excavations, in: Budavari, S. (ed): Rock Mechanics in mining practice, South African Institute of Mining and Metallurgy Monograph Series, Johannesburg, vol. 5 (1983), pp. 201–220

-
13. Moser, A.; Wagner, H.; Schinagl, S.: Application of rock mass classification systems as a tool for rock mass strength determination, in: Deep Mining 2017: 8th Int. Conf. deep and high stress mining. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2017, pp 569–585
 14. Ryder, J.A. and Jager, A.J.: A textbook on rock mechanics for tabular hard rock mines. Published by: Safety in Mines Research Advisory Committee. 23 Jorissen Str., Braamfontein, Johannesburg, South Africa, 2002