Berg Huettenmaenn Monatsh (2020) Vol. 165 (2): 97–105
<https://doi.org/10.1007/s00501-020-00944-9>
 © Der/die Autor(en) 2020

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Quo vadis – Bergmännische Gebirgsmechanik?

Horst Wagner

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

Eingegangen 17. Dezember 2019; angenommen 5. Januar 2020; online publiziert 29. Januar 2020

Zusammenfassung: Der Beitrag beschreibt die Entwicklung der bergmännischen Gebirgsmechanik seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts. In diesem Zeitraum veränderte sich der Umgang mit der Gebirgsdruckproblematik im Bergbau von Grund auf. War ursprünglich der Schwerpunkt der Anstrengungen auf dem Gebiet des Grubenausbaus, d. h. der Beherrschung des druckhaften Gebirges, so liegt heute der Fokus der Bemühungen bei der Vermeidung des Auftretens druckhafter Situationen durch ingenieurmäßige Planung des Grubenzuschnitts und der Abbauführung. Möglich gemacht wurde dieser Paradigmenwechsel durch die Tätigkeit einer Reihe von europäischen und außereuropäischen Bergbauforschungsorganisationen, wie die des deutschen, englischen und französischen Steinkohlenbergbaus oder des südafrikanischen Steinkohle- und Goldbergbaus. Daneben waren auch einige staatliche industriennahe Forschungsorganisationen in Nordamerika und Australien involviert. In der Zeit von 1950 bis etwa 1980 wurde das wissenschaftliche Fundament der modernen Gebirgsmechanik geschaffen. Unterstützt durch Entwicklungen auf dem Gebiet der numerischen Analyse der komplexen Spannungs- und Verformungsvorgänge im Gebirge, als Folge des Abbaus der Rohstofflagerstätten, konnten mit Hilfe semiempirischer Kriterien die Grundlagen für die ingenieurmäßige gebirgsmechanische Planung von Bergwerken geschaffen werden. Vom Nutzen dieser Entwicklung zehren wir heute. Nach erfolgreichem Wiederaufbau Europas nach dem 2. Weltkrieg und dem Wiedererstarken des europäischen Wirtschaftsraumes haben sich viele europäische Länder aus dem Bergbau und damit auch der Bergbauforschung zurückgezogen. Eine direkte Folge davon ist, dass die Bergbauforschung heute vornehmlich an Universitäten erfolgt. Diese sind jedoch nur in einem begrenzten Umfang

in der Lage, eine strukturierte zukunftsorientierte Bergbauforschung durchzuführen. Die wesentlichen Fortschritte auf dem Gebiet der Grundlagen der Gebirgsmechanik, des Grubenausbaus und der Bergbauplanung werden dargestellt und es wird gezeigt, wie diese die Entwicklung der modernen Gebirgsmechanik geprägt haben. Die noch offenen Fragenkomplexe, die vornehmlich multi-disziplinärer Natur sind, werden angesprochen, wobei die Frage gestellt wird, ob die Universitätsstruktur geeignet ist, diese zu lösen.

Schlüsselwörter: Entwicklung der Gebirgsmechanik, Verhalten von Gestein und Gebirge, Ausbauphilosophie, Planungskriterien, Aufgaben der bergmännischen Gebirgsmechanik

Quo vadis—Mining Rock Engineering?

Abstract: The paper describes and analyses the development of rock mechanics and rock engineering since the middle of the 20th Century. During this seventy year period a fundamental change has taken place. In the early days the emphasis was on controlling and managing the effects of high rock stresses on mining excavation behaviour by means of support. The reason for this was a comparative lack of knowledge of the fundamental behaviour of rock and rock masses. The reconstruction of Europe in the wake of World War 2 depended on the availability of minerals. For this reason mining activities in many European countries were state-owned or state-controlled. Mining and in particular rock mechanics research was conducted by central research organizations closely linked to specific mineral commodities, notably coal. The research approach was long range and in depth. As a result considerable progress was made in advancing rock mechanics knowledge and understanding. The direct consequence was a change from an experience-based approach to rock engineering problems to a science-based approach, which culminated in the development of rock engineering as a discipline. The result was a change from the traditional damage control approach by means of excavation support to a design-based approach based on avoiding unfavourable rock stress situations by

Nach einem Vortrag, gehalten am 6. November 2019 beim Rohstoffkolloquium 2019 an der Montanuniversität Leoben, Österreich.

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

means of improved mine design concepts. This was facilitated by advancements in the area of numerical modelling, both in the area of software and in hardware. This made it possible to analyse complex mining situations in realistic times. By means of back analyses semi-empirical design criteria were developed and used to good effect. The more important ones of these developments are discussed in the paper. Of concern is that after successful reconstruction of Europe most European states withdrew from direct involvement in mining. Major industries closed down and with them also the associated mining research establishments. Valuable expertise was lost and mining-related and in particular rock mechanics research is now covered by the universities. However, these are not structured to conduct long range structured research programmes. There is a justified fear that progress in rock engineering research will slow down and that some of the as yet unsolved and mostly multi-disciplinary problems will not be addressed because the university structure and culture is not appropriate for solving multi-disciplinary problems. These and other points are addressed in the paper.

Keywords: Fundamental rock mechanics issues, Support philosophy, Rock reinforcement principles, Rock engineering mine design criteria

1. Einleitung

Nach 60 Jahren beruflicher und fachlicher Tätigkeit auf dem Gebiet der bergmännischen Gebirgsmechanik darf die Frage gestellt werden, wie sich dieser für den Bergbau so wichtige Wissenszweig entwickelt hat und wohin er sich weiter entwickeln soll. Ich war und bin in der glücklichen Lage, dass ich im Laufe meiner beruflichen Entwicklung und Tätigkeit im Inland wie auch im Ausland, sowohl als Forscher als auch als Anwender, die Entwicklung der Gebirgsmechanik zu einer Ingenieurdisziplin hautnah erleben und auch gestalten durfte. Für meine Betrachtungen habe ich bewusst die Bezeichnung „bergmännische Gebirgsmechanik“ gewählt. Damit will ich zum Ausdruck bringen, dass es um die Anwendung der Grundlagen der Gebirgsmechanik auf die Bearbeitung und Behandlung der Gebirgsdruckprobleme im Bergbau geht. In diesem Zusammenhang soll und muss die Frage gestellt werden, in welcher Weise sich die Gebirgsdruckproblematik im Bergbau von jener in anderen Bereichen des Hohlraumbaus unterscheidet. Die Antwort ist einfach. Durch den großräumigen Abbau der Rohstoffvorkommen kommt es zu regionalen Spannungsumlagerungen im Gebirge und damit verbunden zu dynamischen Gebirgsdruckerscheinungen. Diese können jedoch durch entsprechende Planung gesteuert werden. Diese wichtige Komponente fehlt beim üblichen Hohlraumbau.

2. Vom Gebirgsdruck zur Gebirgsmechanik

Als ich vor 60 Jahren mein Bergbaustudium an der damaligen Montanistischen Hochschule begann, war der Begriff Gebirgsmechanik noch weitgehend unbekannt und man

sprach von Gebirgsdruck. Ausdrücke wie standfestes Gebirge oder druckhaftes Gebirge waren üblich, um den Gebirgszustand zu beschreiben. Von den mehr als 1200 Seiten des damaligen zweibändigen Standardwerkes des Bergbaus, der „Bergbaukunde“ von C.H. Fritzsche [1], behandelten gerade 20 Seiten Grundlagen des Gebirgsdrucks, während sich 200 Seiten mit Fragen des Ausbaus von Schächten, Strecken und Abbauen befassen. Dies beschreibt den damaligen Zugang zur Frage der Gebirgsbeherrschung im Bergbau, nämlich die Auswirkungen des Gebirgsdruckes durch Ausbau zu behandeln. Die Auswirkungen des Abbaus der Lagerstätten auf den Gebirgszustand wurden mit Hilfe von Gebirgsdruckmodellen beschrieben. Diese sind im Wesentlichen einfache mechanistische Modelle, die die gleichen charakteristischen Eigenschaften aufweisen, wie sie unter Tage beobachtet werden. Beispiele sind die Gewölbetheorie von Spackeler [2] oder die Plattentheorie von Kegel (1942), die die Spannungsverteilung vor und hinter einem Langfrontabbau zeigen. Diese Modellvorstellungen waren geeignet, die Spannungssituation in der Umgebung des Abbaustoßes eines Langfrontabbaus zu beschreiben, jedoch nicht für deren quantitative Beurteilung.

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen, insbesondere Kohle und Erze, war eine der Voraussetzungen für den Wiederaufbau Europas nach dem 2. Weltkrieg. Der Großteil des europäischen Bergbaus war verstaatlicht und von nationalem Interesse. In diesen Zeitraum fiel auch die Blütezeit der Rohstoffforschung. Führend war dabei der Kohlebergbau mit den bekannten Forschungszentren, wie Bergbauforschung (Deutschland), Bretby-NCB (England), CERCHAR (Frankreich), GIG (Polen) und Internationales Büro für Gebirgsmechanik (damalige DDR). Jedoch auch außerhalb von Europa wurde intensiv geforscht. Beispiele sind das US Bureau of Mines (USA), CANMET (Kanada), CSIRO (Australien) sowie CSIR und Chamber of Mines (Südafrika). Weiterhin zu erwähnen sind die Forschungsinstitute der früheren UdSSR.

Es muss an dieser Stelle vermerkt werden, dass beginnend mit etwa 1980, d.h. nach beendetem Wiederaufbau, die staatlichen Bergbaubetriebe in Europa zum größten Teil geschlossen wurden und als Folge davon auch die damit verbundenen Forschungsorganisationen. Etwas später wurden auch zahlreiche Forschungsorganisationen in Nordamerika und Südafrika entweder geschlossen oder privatisiert. Dies führte weitgehend zum Ende der langfristig angelegten strukturierten Forschung auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik. In verstärktem Maß verlagerte sich die Forschung an die Universität. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, war diese jedoch projektspezifisch und kurzzeitorientiert (vgl. Wagner und Fettweis [3]).

Parallel zu diesen bergbaubezogenen gebirgsmechanischen Forschungsaktivitäten fanden die Aktivitäten des legendären Salzburger Kreises statt. Es handelte sich hier um eine multi-disziplinäre Gruppe von führenden Geologen, Bau- und Bergbauingenieuren, Mechanikern, Physikern und Mathematikern, die sich in regelmäßigen Abständen in Salzburg traf, um Gebirgsdruckfragestellungen, vor allem aus dem Bereich des untertägigen Infrastrukturbaus, mit Ingenieurmethoden zu lösen. Der Arbeitsschwerpunkt dieser Gruppe war vor allem die ingenieurmäßige Behandlung

des diskontinuierlichen Gebirgsverbandes. Prominente Mitglieder dieser Gruppe waren Clar, Stini, Föppl, Prandtl, Müller und Rabcewicz [4]. Diese Aktivitäten führten im Jahr 1962 zur Gründung der Internationalen Gesellschaft für Gebirgsmechanik (ISRM) mit Prof. Leopold Müller als erstem Präsidenten. Heute ist die ISRM eine globale Vereinigung mit mehr als 7500 Mitgliedern und über 55 nationalen Gruppen.

3. Entwicklungen der Grundlagen der Gebirgsmechanik

Die intensive Beschäftigung der Bergbau- und der Bauindustrie mit grundlegenden Fragen des Verhaltens von Gestein und Gebirge in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts führte zu einem rasanten Wissenszuwachs auf dem Gebiet des mechanischen Verhaltens von Gestein und Gebirge und des Verständnisses der grundlegenden Mechanismen der Bruchvorgänge im Grubenbaue sowie der Anforderungen an Abbausysteme. Die Erfolge dieser Forschungsaktivitäten beruhten vor allem darauf, dass sie auf strukturierten Langzeitprogrammen aufbauen konnten. Parallel zu diesen Aktivitäten fand die explosionsartige Entwicklung auf dem Gebiet der numerischen Modellierung und Analyse statt. Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen für die Analyse und Bearbeitung komplexer gebirgsmechanischer Problemstellungen.

Das wesentliche Ergebnis dieser Forschungsaktivitäten war die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen betreffend das Verhalten von Gestein und Gebirge und damit des wissenschaftlichen Fundaments für die Gebirgsmechanik. Gebirgsmechanik ist die theoretische und angewandte Wissenschaft des mechanischen Verhaltens von Gestein und Gebirge; es ist der Teilbereich der Mechanik, der sich mit der Reaktion von Gestein und Gebirge auf das Kräftefeld in seinem physikalischen Umfeld befasst. Im Folgenden werden die aus der Sicht des Autors bedeutendsten Entwicklungen zusammengefasst.

3.1 Mechanisches Verhalten von Gestein

Maßgebend für das bessere Verständnis des Verhaltens von Gestein unter Druckbeanspruchung waren die Arbeiten von Cook (Chamber of Mines of South Africa) [5] sowie Fairhurst und Wawersik (University of Minnesota) [6]. Zu dem damaligen Zeitpunkt bestand, auf der Grundlage von Druckversuchen in Prüfpresen, die allgemeine Auffassung, dass spröde Gesteine unter Druckbelastung schlagartig und unter Freisetzung kinetischer Energie versagen. Dieses Verhalten stand jedoch nicht im Einklang mit dem Versagen spröder Gesteine um untertägige Hohlräume, welches in der überwiegenden Zahl der Fälle stabil erfolgt. Cook [5] und später Wawersik und Fairhurst [6] konnten nachweisen, dass die Ursache für das plötzliche schlagartige Versagen der Gesteinsproben beim Druckversuch die im Prüfsystem gespeicherte Energie ist, welche beim Abfall des Widerstandes der Gesteinsprobe nach Überschreiten der maximalen Festigkeit freigesetzt wird. Diese Erkenntnis hat das

Abb. 1: Zwei Klassen von Hartgesteinen bei einaxialer Druckbelastung. Klasse II inhärentes Sprödgestein. (Nach Wawersik und Fairhurst [6])

Abb. 2: Axiales Kraft-Verformungsverhalten einer gebrochenen Marmorprobe. (Nach Wawersik und Fairhurst, [6])

Verständnis der Bruchvorgänge im Gebirge von Grund auf verändert und weitreichende Auswirkung auf die Planung und Auslegung von Abbausystemen in ultratiefen Bergwerken und solchen, die auf der Verwendung von Bergfesten beruhen, beeinflusst [7]. Mit Hilfe von ultrasteifen servogesteuerten Prüfsystemen konnten Wawersik und Fairhurst [6] zeigen, dass bei den Hartgesteinen zwei unterschiedliche Klassen zu finden sind, nämlich solche, die inhärent spröde sind, d. h. Gesteine, bei denen die zum Bruchbeginn gespeicherte Energie größer ist als die zur Schaffung neuer Bruchflächen erforderliche Energie, Klasse II, während bei den anderen Hartgesteinen das Verhalten nach Überschreiten der maximalen Festigkeit von der Steifigkeit des Belastungssystems abhängig ist und die Zufuhr von externer Energie erfordert, um den Bruchvorgang fortzusetzen, Klasse I (Abb. 1).

Mit Hilfe der servo-gesteuerten Prüfsysteme wurde es möglich, das Verhalten von Gesteinsproben nach Überschreiten der maximalen Festigkeit näher zu untersuchen. Damit konnte ein erster Schritt zum besseren Verständnis des Verhaltens von Gebirge gemacht werden. Abb. 2 zeigt das Kraft-Verformungsverhalten einer Marmorprobe für verschiedene Stufen der Verformung nach Überschreiten der maximalen Festigkeit. Die Degradation der mechanischen Eigenschaften der gebrochenen Marmorprobe mit zunehmenden Belastungsschritten ist deutlich erkennbar.

3.2 Gebirgsklassifikation und Gebirgsverhalten

Das Gebirge als Material unterscheidet sich von anderen Ingenieurmaterialien dadurch, dass es von wenigen Aus-

Abb. 3: Zusammenstellung der Parameter für die Beurteilung der Gebirgsgüte mit Hilfe von Gebirgsklassifikations-Verfahren

rock mass classification methods				
		HOEK-BROWN	BIENIAWSKI	BARTON
		1997	1989	1974
input parameter	rock		rock strength	
	discontinuities	"structure" (interlocking of blocks)	RQD (quality of drillcore)	RQD (quality of drillcore)
			spacing of discontinuities	discontinuity sets
		condition of discontinuities	condition of discontinuities	roughness of discontinuities
				joint alteration
		orientation of discontinuities		
		groundwater conditions	groundwater conditions	
			stress cond.	
result		GSI value	RMR value	Q value
		10-100	0-100	0,001-1000

nahmen abgesehen anisotrop, inhomogen, diskontinuierlich, unregelmäßig und voller Defekte ist. Zudem ist das Gebirge im Allgemeinen nicht zugänglich und kann in vielen Fällen nicht oder nur unvollständig erschlossen und häufig nur mit indirekten Methoden erfasst oder beurteilt werden. Zudem kann das Gebirge nicht mit einfachen mechanischen Verfahren in situ geprüft werden. Das Gebirge stellt daher einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor bei der ingenieurmäßigen Bearbeitung gebirgsmechanischer Problemstellungen dar. Gegen diesen Hintergrund ist es daher nicht überraschend, dass sich der Salzburger Kreis schon frühzeitig und intensiv mit dem Gebirge beschäftigt. Die Ergebnisse vieler Arbeiten haben ihren Niederschlag in den umfangreichen Arbeiten von Müller [4] gefunden. Während sich der Salzburger Kreis vornehmlich mit detaillierten Untersuchungen einzelner Komponenten des Gebirges befasste und stark geologisch und strukturgeologisch ausgerichtet war, ist man in den englisch sprechenden Ländern einen anderen Weg gegangen, nämlich den der Gebirgsklassifikation. Die verschiedenen Einflussfaktoren wurden in Gruppen zusammengefasst und entsprechend der ihnen zugeordneten Bedeutung gewichtet. Die drei verbreitetsten Klassifikationsverfahren unterscheiden drei Gruppen von Eingabeparametern, nämlich Gesteinsfestigkeit, Diskontinuitäten und Diskontinuitätseigenschaften und Orientierung der Diskontinuitäten in Relation zur betrachteten Hohlraumwandung sowie Einfluss von Wasser. Abb. 3 gibt einen Überblick der verschiedenen Verfahren. Die drei Verfahren verwenden die gleichen Parameter, jedoch in unterschiedlicher Weise. Dies gilt nicht nur für die Gewichtung, sondern auch für die Bestimmung der Klassifikationszahl. Im Falle der Verfahren von Marinos et al. [8] und Bieniawski [9] ist die Bewertung eine Zahl zwischen 0 und 100, wobei die Zahl 100 ein weitestgehend ungestörtes Gebirge beschreibt. Im Falle des Q-Systems von Barton et al. [10] entspricht der Wert 1000 einem exzellenten Gebirge. Aus der Sicht des Anwenders ergibt sich die Frage, ob eine skalare Größe ein komplexes geologisches Material mit ausgeprägter Richtungsabhängigkeit beurteilen kann.

Von den verschiedenen Gebirgsklassifikationsverfahren hat das GSI-Verfahren breite Anwendung gefunden, da mit Hilfe der GSI-Werte die Parameter für das Hoek-Brown Gebirgsfestigkeitskriterium bestimmt werden können. Das

Abb. 4: Zusammenhang zwischen den Kennwerten RMR, GSI und Q und der normalisierten Gebirgsdruckfestigkeit, Hoek [12]

ursprüngliche von Marinos et al. [8] entwickelte GSI-Modell wurde später erweitert und verfeinert. Die Erfahrungen zeigten, dass ein beruflicher Hintergrund auf dem Gebiet der Ingenieurgeologie erforderlich ist, um das GSI-Modell richtig anzuwenden. Die letzte Version von Hoek et al. [11] hat das Modell anwendungsfreundlicher gemacht.

Abb. 4 zeigt den Einfluss des Gebirgszustandes ausgedrückt durch den Gebirgsklassifikationswert auf die normalisierte Gebirgsfestigkeit und den Verformungsmodul. Aus der Abbildung geht die Bedeutung der Beurteilung der Gebirgsgüte für die mechanischen Gebirgseigenschaften hervor. Obwohl der allgemeine Trend eindeutig ist, bestehen, insbesondere im Bereich niedriger Gebirgsklassifikationswerte, große Unterschiede zwischen den verschiedenen Prognoseformeln.

Auf der Grundlage der Gebirgsklassifikationswerte wurde eine Reihe von Nomogrammen zur Beurteilung der Ausbauerfordernisse erstellt, auf die jedoch nicht näher eingegangen wird, da insbesondere im Falle von Hohlraumausbau die Orientierung des Trennflächengefüges auf die erforderlichen Stützmaßnahmen eine große Rolle spielt, die jedoch nicht durch eine einzelne Zahl ausgedrückt werden kann.

3.3 Ausbau

Auf dem Gebiet des Grubenausbaus fand in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ein Paradigmenwechsel statt, nämlich der Wechsel vom Unterstützungsausbau zum Konzept der Förderung der Eigentragfähigkeit des Gebirges in der unmittelbaren Umgebung des Grubenbaus. Über Jahrhunderte waren der Holzstempel und der Türstock der Inbegriff des Grubenausbaus. Später wurde der Holzausbau durch den Stahlausbau ersetzt. Der Holzstempel durch den stählernen Reibungsstempel und in weiterer Folge durch den Hydraulikstempel. Der Türstock durch den Stahlbogen- und den Stahlringausbau. Wo erforderlich, wurde der Stahlausbau durch ineinander verschiebbare Profilbögen nachgiebig gemacht. Die einzige technische Entwicklung in Richtung Anpassung an höhere Gebirgsdrücke war die Erhöhung des Metergewichts der Stahlbögen und Ringe von 21 kg/m auf über 50 kg/m. Im Rahmen des Snowy Mountain Hydroprojektes in Tasmanien fand Mitte des vergangenen Jahrhunderts eine Ausbaurevolution statt, nämlich die Einführung des Ankerausbaus. Führend war dabei der amerikanische Bergbauingenieur Tom Lang [13]. Im europäischen Raum wurden erste Ankerversuche von Rabcewicz [14] durchgeführt, der zeigte, dass man mit mechanischen Ankern Hohlräume in losem Geröll offen halten kann. Im Tunnelbau gewann der Ankerverbundausbau in Zusammenarbeit mit Spritzbeton an Bedeutung. Im Örterbau in Kohlebergwerken in den USA, Australien und Südafrika wurde innerhalb kurzer Zeit die Firstsicherung mit Gebirgsankern die Standardausbaumethode. Im Sandstein wurden mechanische Endanker eingesetzt, im Kohleschiefer bewährten sich die Klebeanker. Trotz anfänglichem Widerstand setzte sich der Ankerausbau auch im tiefen deutschen Steinkohlebergbau durch. Der Erfolg des Ankerausbaus gründet sich auf seiner Wirkungsweise. Der Gebirgsanker erhöht die Scherfestigkeit des aufgelockerten Gebirges in der Umgebung des Grubenbaus einerseits durch seine Scherfestigkeit, vor allem jedoch durch die Vorspannung, die Druckspannungen um den Hohlraum erzeugt und die Reibungskräfte in der Auflockerungszone mobilisiert. Dies zusammen mit der Orientierung der Krafteinleitung, die der Bewegung des aufgelockerten Gebirges in den Hohlraum entgegenwirkt, führt zu einer Stabilisierung des Gebirges um den Hohlraum. Im englischen Sprachgebrauch spricht man bezeichnender Weise von „rock reinforcement“.

Einer der Nutzeffekte des Ankerausbaus ist die viel effizientere Nutzung des Stahls. Im Schnitt beträgt der Stahleinsatz beim Ankerausbau im Vergleich zum Stahlbogausbau nur etwa 20%. In ähnlicher Weise hat sich

Abb. 5: Anforderungen an Ausbausysteme. (Nach Kaiser et al. [18])

der Ankerverbundausbau auch im tiefen Hartgesteinsbergbau durchgesetzt. Einer der Nachteile des Ankerausbaus ist geringe Bruchverformung und eng damit verbunden die geringe Energieaufnahme von Ankerausbausystemen. Dieses ist ein wesentliches Kriterium für die Eignung von Ausbausystemen unter dynamischen Belastungssituationen, wie sie bei Gebirgsschlägen auftreten [15]. Spezielle nachgiebige Gebirgsanker für den Einsatz in Bergwerken mit Gebirgsschlägen wurden entwickelt. Diese können mehrere 100 mm Gebirgsverformung bruchfrei, bei Aufrechterhaltung der Ankerkraft aufnehmen, und dadurch Energie absorbieren [16]. Ankerverbundausbausysteme bestehend aus nachgiebigen Ankern, Maschendraht und Drahtseilverzug haben sich in tiefen Goldbergwerken gut bewährt [17].

Die Anforderungen an moderne Ausbausysteme können wie folgt zusammengefasst werden (Abb. 5):

- Einschluss der Bruchzone um den Grubenbau
- Schaffung von Druckspannungen im Umfangsbereich des Hohlraumes
- Kontrolle der Gebirgsdeformationen um den Grubenbau
- Hohes Energieaufnahmevermögen des Ausbausystems

3.4 Numerische Verfahren

Vor 1950 war die numerische Analyse gebirgsmechanischer Problemstellungen auf einfache Geometrien und Materialgesetze, für die analytische Lösungen vorhanden waren, beschränkt wie z.B. kreisförmige Hohlräume oder einfache Geometrien wie Balken oder Platten. Komplexere Geometrien wurden mit Methoden der Spannungsoptik untersucht. Die Möglichkeiten der quantitativen Beurteilung des Spannungs- und Verformungszustandes in der Umgebung von Grubenbauen waren daher sehr beschränkt. Für die Beurteilung und Interpretation des Spannungszustandes

Abb. 6: Gewölbetheorie nach Spackeler [2]

im Gebirge wurden daher einfache Gebirgsdruckmodelle herangezogen, wie die Gewölbetheorie von Spackeler ([2]; Abb. 6) oder die Theorie der pseudoplastischen Trogdecke von Jacobi [19].

Parallel zu den Fortschritten auf dem Gebiet der Grundlagen des Verhaltens von Gestein und Gebirge sowie dem neuen Verständnis der Aufgaben und Anforderungen an Ausbausystemen hat eine dramatische Entwicklung im Bereich der numerischen Verfahren für die Analyse der Auswirkung der bergbaulichen Tätigkeiten auf die Spannungen und Verformungen im Gebirge stattgefunden. Dies betrifft sowohl

- die Natur der Modelle, die kontinuierlich oder diskontinuierlich sein kann,
- das Materialverhalten, welches elastisch, plastisch, zeitabhängig oder zeitunabhängig sein kann, und
- den Lösungsalgorithmus.

Eine detaillierte Beschreibung und Diskussion der verschiedenen numerischen Verfahren, die heute vorhanden sind und eingesetzt werden, geht weit über den Rahmen dieses Beitrags hinaus. Der interessierte Leser wird auf die umfangreichen Zusammenfassungen des Entwicklungsstandes auf dem Gebiet der numerischen Modellierung gebirgsmechanischer Frage- und Problemstellungen verwiesen [17, 20, 21].

3.5 Planungskriterien

Auf der Grundlage der Fortschritte im Verständnis des Verhaltens von Gestein und Gebirge und der Fähigkeit, die Spannungen und Verformungen im Grubengebäude mit Hilfe der numerischen Verfahren zu beschreiben, ist es nunmehr möglich geworden, die Spannungen und Verformungen im Grubengebäude zu bestimmen und in Zahlenwerten auszudrücken. Dadurch können die Gebirgsdruckerscheinungen im Grubengebäude in Beziehung zu den Spannungen und Verformungen gebracht und auf diese Weise semiempirische Planungskriterien entwickelt werden.

Damit eröffnen sich völlig neue Dimensionen für die Bergbauplanung. Voraussetzung dafür sind jedoch relevante und zuverlässige Planungskriterien, d.h. Parameter, die eine realistische Beurteilung des In-situ-Zustandes der Grubenbaue auf der Basis der numerisch bestimmten Planungskennwerte erlauben. Das beste Beispiel ist der tiefe Goldbergbau in Südafrika. Für diesen wurde eine Reihe von Planungskriterien entwickelt, die die Grundlage für die

Abb. 7: Zusammenhang zwischen RCF-Wert, Hohlraumzustand und Ausbau. σ_1, σ_3 sind die Hauptspannungen an der Position der Strecke, σ_c ist die Gesteinsdruckfestigkeit und F ist ein Faktor, der die Gesteinsfestigkeit verringert entsprechend dem Zerlegungsgrad des Gebirges. Fliegt zwischen 1 für ungestörtes und 0,5 für gestörtes Gebirge [17]

langfristige Planung und den Betrieb von tiefen Bergwerken bilden [17, 22]. Beispiele derartiger Kriterien sind:

- der *RCF – Rock wall condition factor* für die Planung der Bergbauinfrastruktur
- die *ERR – Energy release rate* für die Abbauplanung
- der *ESS – Excess shear stress* für die Abbauplanung in der Nähe von Störungen

Gemeinsam ist diesen Planungskriterien, dass sie auf einer soliden gebirgsmechanischen Grundlage beruhen und durch umfangreiche Industriedaten gestützt werden. Im Falle des RCF-Faktors wurden ungefähr 100km Strecken in verschiedenen Goldbergwerken analysiert und evaluiert [23]. Dabei wurde der Spannungszustand entlang der Strecken unter Berücksichtigung der Abbaugeometrie mit Hilfe eines Spannungsanalyseprogramms für plattenförmige Lagerstätten berechnet und der Streckenzustand sorgfältig aufgenommen und dokumentiert. Die Ausbaudetails wurden erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt. Zusätzlich wurde die Gesteinsfestigkeit bei den jeweiligen Beurteilungspunkten bestimmt. Daraus ergaben sich die in Abb. 7 dargestellten Zusammenhänge. Der RCF-Faktor hat sich auch für die Beurteilung von Strecken im alpinen Bergbau als geeignet erwiesen.

Andere Planungskriterien auf semi-empirischer Basis sind die Stabilitätsdiagramme von Mathews [24], Laubscher [25], Esterhuizen et al. [26], Mawdesley et al. [27], die zur Beurteilung von Abbaudimensionen herangezogen werden. Mit Hilfe dieser Diagramme können die maximalen Abmessungen für permanent offene Abbauhohlräume bzw. die für einen zuverlässigen Bruchbau erforderlichen Mindestspannweiten bestimmt werden. Diese Verfahren werden vor allem in Australien, Kanada, Südafrika und USA angewandt. Stellvertretend für andere Stabilitätsdiagramme zeigt Abb. 8 jenes von Mathews [24]. Die Stabilitätszahl basiert auf dem Gebirgsklassifikationsverfahren von Barton [10]. Der hydraulische Radius ist das Verhältnis der betrachteten Hohlraumfläche und deren Umfang.

Abb. 8: Stabilitätsdiagramm nach Mathews et al. [24]

4. Paradigmenwechsel in der bergmännischen Gebirgsmechanik

Die Entwicklungen seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts haben zu einem Paradigmenwechsel der bergmännischen Gebirgsmechanik geführt, nämlich von der Schadenbegrenzung zur Schadenvermeidung. War der Schwerpunkt früher auf dem Ausbausektor, so liegt er nunmehr auf der gebirgsmechanischen Planung.

Ziel der modernen gebirgsmechanischen Planung ist es, Bereiche ungünstiger Spannungsverhältnisse zu vermeiden und Bereiche günstiger Spannungsverhältnisse bewusst zu schaffen. Das Mittel dazu sind die durch den Abbau verursachten regionalen Spannungsumlagerungen. Das Prinzip kann am Beispiel der Spannungsumlagerungen beim Langfrontabbau plattenförmiger Lagerstätten gezeigt werden (Abb. 9). Vor dem Abbaustoß ist der Bereich hoher Spanningskonzentrationen, Isolinien >1 , ober- und unterhalb des abgebauten Bereichs ist der druckentspannte Bereich, Isolinien <1 . Dieser Bereich kann genutzt werden, um Strecken und sonstige wichtige Bergbauinfrastruktur vor hohem Gebirgsdruck zu schützen.

Wahrscheinlich das extremste Beispiel ist der Schutz tiefer Schächte vor den Abbauauswirkungen. Die traditionelle Methode ist, Schachtsicherheitsfesten stehen zu lassen. Da die Spannungen in Bergfesten immer höher sind als die primären Gebirgsspannungen, bedeutet dies,

Abb. 9: Mit dem Teufendruck normalisierte Verteilung der vertikalen Spannungen um einen plattenförmigen Abbauhohlraum in großer Teufe, Spannweite 300 m, Abbaumächtigkeit 2 m

dass die zahlreichen Grubenbaue in der unmittelbaren Umgebung von Schächten in großen Teufen überbelastet und beschädigt werden. Aus diesem Grunde wurde 1970 von dem Konzept der Schachtsicherheitsfesten abgegangen und der Bereich um tiefe Schächte planmäßig abgebaut und versetzt, um die Verformungen der Schachtsäule und

der Einbauten so zu gestalten, dass diese technisch beherrscht werden können. Es ist bezeichnend, dass seit diesem Zeitpunkt kein neuer sehr tiefer Schacht im Goldbergbau durch Schachtsicherheitsfesten geschützt wird [28].

5. Schlussfolgerungen

In den vergangenen Jahrzehnten wurden große Fortschritte im Verständnis des Verhaltens des Gebirges und der Strukturen im Gebirge gemacht [20]. Wir haben gelernt, die Eigentragfähigkeit des Gebirges zu verbessern und die Spannungen und Verformungen im Gebirge mit Hilfe einer breiten Palette von numerischen Verfahren zu berechnen. Die breite Umsetzung dieser Fortschritte wird jedoch durch das mangelnde Wissen der Geologie und insbesondere der Strukturgeologie, die Schwierigkeiten bei der Bestimmung und Quantifizierung der mechanischen Gebirgseigenschaften und Parameter sowie das mangelnde Wissen über die In-situ-Spannungszustände eingeengt. Dies gilt insbesondere für den Wissensstand zum Planungszeitpunkt. Der alte Bergmannsspruch „Vor der Hacke ist es duster“ hat leider immer noch Gültigkeit.

6. Quo vadis?

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die bergmännische Gebirgsmechanik immer mehr spezialisiert und in zahlreiche Teilbereiche aufgespalten und dieser Trend setzt sich immer noch fort. Der Drang zum Spezialistentum und der damit verbundenen Fachsprache führt dazu, dass die verschiedenen Spezialisten nicht mehr miteinander kommunizieren können und aneinander vorbei reden. Darüber hinaus sind die Spezialisten so mit sich beschäftigt, dass sie den Kontakt mit der Wirklichkeit und den Blick für die großen Zusammenhänge verlieren.

Was war die Stärke und das Geheimnis des „Salzburger Kreises“, der als Beginn der modernen Gebirgsmechanik angesehen werden kann? Es war die Vielzahl der Disziplinen und das Bemühen, miteinander zu sprechen und voneinander zu lernen. Davon entfernen wir uns immer mehr.

Viele der bedeutenden Fortschritte auf dem Gebiet der Grundlagen der modernen Gebirgsmechanik und deren praktischer Anwendung in der Bergbauindustrie gehen auf die früher erwähnten Industrieforschungszentren zurück. Diese wurden jedoch als Folge struktureller Änderungen der Bergbauindustrie geschlossen. Die heutigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik erfolgen vornehmlich auf Universitäten und mit Einbindung von Dissertanten. Die Themen werden von den Auftraggebern bestimmt. Die Schaffung von Forschungsschwerpunkten wird dadurch sehr erschwert. Mit schuld an dieser Situation ist die Organisationsform der Universitäten, die fachspezifisch ist, während die Probleme der Gesellschaft komplex und multidisziplinär sind. Der immer größer werdende Druck für die Lehrstühle, Drittmittel einzuwerben, führt zu einem ungesunden Wettbewerb an den Universitäten und beeinträchtigt die Zusammenarbeit.

Hier sind die Universitätsleitungen gefordert. Gemeinsame fächerübergreifende Schwerpunkte könnten die Antwort sein. Diese Entwicklung erfüllt mich mit Sorge, denn die im Kapitel „Schlussfolgerungen“ angesprochenen Problem-bereiche können meiner Meinung nach nur durch enge Zusammenarbeit der Fachleute auf dem Gebiet der Geologie, Geophysik, Geomechanik, Numerik, Messtechnik, Bergbau und Tunnelbau miteinander und zusammen mit der Industrie gelöst werden.

Lassen Sie mich mit dem Leitspruch meines verehrten Lehrers Günther Fettweis schließen:

„Bergbau ist nicht eines Mannes Sache“.
Das gilt auch für die Gebirgsmechanik.

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

Verwendete Literatur

1. Fritzsche, C.H.: Lehrbuch der Bergbaukunde, Bd. 1 u. 2, 10. Aufl. des von F. Heise u. F. Herbst begründeten Werkes, Berlin (u. a.): Springer, 1961, 1962
2. Spackeler, G.: Gewölbebildung über Abbauen, Glückauf 70 (1934), Hefte 26/27: S. 158 u. f.
3. Wagner, H.; Fettweis, G.B.L.: About science and technology in the field of mining in the Western world at the beginning of the new century, Glückauf 139 (2003), Nr. 7/8, S. 418–423
4. Müller, L.: Der Felsbau, Bd. 1, Stuttgart: Enke, 1963
5. Cook, N.G.W.; Hojem, J.P.M.: A rigid 50-ton compression and tensile testing machine, Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering 16 (1966), pp 89–92
6. Wawersik, W.R.; Fairhurst, C.: A study of brittle fracture in laboratory compression tests, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 7 (1970), iss. 5, pp 561–575
7. Salamon, M.D.G.: Stability, instability and the design of pillar workings, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 7 (1970), iss. 6, pp 613–631
8. Marinos, P.G.; Marinos, V.; Hoek, E.: The Geological Strength Index (GSI)—A characterization tool for assessing the engineering properties of rock masses. In: Romana, M.; Peruchio, A.; Olalla, C. (eds.): Underground works under special conditions, London: Taylor & Francis, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1201/NOE0415450287.ch2>
9. Bieniawski, Z.T. (ed.): Rock mass classification in rock engineering, Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, Rotterdam: Balkema, 1976, pp 97–106

10. Barton, N.R.; Lien, R.; Lunde, J.: Engineering classification of rock masses for the design of rock support, *Rock Mechanics* 6 (1974), pp 189–239
11. Hoek, E.; Carter, T.G.; Diederichs, M.S.: Quantification of the Geological Strength Index chart. Paper presented at 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA: ARMA 13–672, 2013
12. Hoek, E.: Estimates of rock mass strength and deformation modulus, Discussion paper Nr 4, 2004; <http://www.rocscience.com>
13. Lang, T.A.: Theory and practice of rock bolting, *AIME Transactions* 220 (1961), pp 333–348
14. Rabcewicz, L.: Modellversuche mit Ankerung in kohäsionslosem Material, *Die Bautechnik* 34 (1957), H.5, S. 171–173
15. Wagner, H.: Support requirements for rockburst conditions. In: *Rockbursts and seismicity in mines*. In: Gay, N.C.; Wainwright, E.H. (eds.): *Seismicity in Mines*, Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy Symposium series 6 (1984), pp 209–218
16. Li, C.C.; Stjern, G.; Myrvang, A.: A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 (2014), iss. 4, pp 315–327
17. Ryder, J.A.; Jager, A.J. (eds.): *A handbook on rock engineering practice for tabular hard-rock mines*, Johannesburg: SIMRAC, 2002
18. Kaiser, P.K.; McCreath, D.R.; Tannant, D.D.: *Canadian Rockburst Support Handbook*, Sudbury, Ontario: Geomechanics Research Centre—Mirarco, Canada, 1996
19. Jacobi, O.: Der Druck auf Flöz und Versatz, *Glückauf* 96 (1960), S. 409–418
20. Brady, B.H.G.; Brown, E.T.: *Rock mechanics for underground mining*, 3. ed., Dordrecht (u. a.): Kluwer, 2004
21. Jing, L.; Hudson, J.A.: Numerical methods in rock mechanics, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39 (2002), iss. 4, pp 409–427
22. Wagner, H.: Deep mining—A rock engineering challenge, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52 (2019), pp 1417–1446, <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01799-4>
23. Wiseman, N.: Factors effecting the design and conditions of mine tunnels. In: *Research Report No. G01G10*, 1979. Johannesburg, South Africa: Chamber of Mines Research Organization, 1979
24. Mathews, K.E.; Hoek, E.; Wyllie, D.C.; Stewart, S.B.V.: Prediction of stable excavation spans for mining at depth below 1000m in hard rock mines, Ottawa, Ontario: CANMET Report DSS Serial No. OSQ80-00081, DSS file Nr. 17SQ.23440-0-9020, Ottawa: Dept. Energy, Mines and Resources, 1981
25. Laubscher, D.H.: Cave mining—the state of the art, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 94 (1994), pp 279–293
26. Esterhuizen, G.S.; Dolinar, D.R.; Ellenberger, J.L.; Prosser, L.J.: *Pillar and roof span guidelines for underground stone mines*, Information Circular 9526 US Department of Health & Human Services, Pittsburgh, PA: NIOSH, 2011
27. Mawdesley, C.; Trueman, R.; Whiten, W.J.: Extending the Mathews stability for open stope design, *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Sect. A*, 110 (2001), pp:A27–A39
28. Wagner, H.; Salamon, M.D.G.: Strata control techniques in shafts and large excavations. In: *Association of Mine Managers of South Africa, Papers and Discussions 1972–73*, Johannesburg: Chamber of Mines of South Africa, 1975, pp 123–138

Weiterführende Literatur

29. Galvin, J.M.; Hebblewhite, B.K.; Salamon, M.D.G.: University of New South Wales pillar strength determinations for Australian and South African mining conditions. In: Mark, C.; Heasley, K.A.; Iannocchione, A.T.; Tuchmann, R.J. (eds): *Proceedings 2nd International workshop on coal pillar mechanics and design*, Vail, 1999, Information Circular US Dept. Health & Human Services NIOSH 9448, Pittsburgh, PA, 1999, pp 63–71
30. Hoek E.; Brown, E.T.: The Hoek-Brown failure criterion—a 1988 update. In: Curran, J. (ed.): *Proceedings of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium*, Toronto: University of Toronto, 1988, pp 3–38
31. Laubscher, D.H.: A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 90 (1990), pp 257–273
32. Ryder, J.A.: Excess shear stress (ESS)—an engineering criterion for assessing unstable slip and associated rockburst hazards. In: Herget, G.; Vongpaisal, S. (eds): *Proceedings of the 6th ISRM Congress*, Montreal, Canada, Rotterdam: Balkema, 1987, vol. 2, pp 1211–15
33. Wagner, H.: Protection of service excavations. In: Budavari, S. (ed): *Rock mechanics in mining practice*, Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 1983, Chapter 9, pp 201–220 (South African Institute of Mining and Metallurgy Monograph series, 5)

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