

**FORTSCHRITTE AUF DEM GEBIET DER GEBIRGSSCHLAGBEKÄMPFUNG IM  
SÜDAFRIKANISCHEN GOLDERZBERGBAU UND DEREN ANWENDBARKEIT AUF  
ANDERE BERGBAUVERHÄLTNISSE**

von

Horst Wagner

---

Bundesministerium für Handel, Gewerbe und Industrie;  
Grundlagen der Rohstoffversorgung, Heft 8, Geotechnik  
und Sicherheit im Bergbau - Bergschlagforschung, Seminar  
in Bad Bleiberg am 7. und 8. Juni 1984, Wien 1985.



**FORTSCHRITTE AUF DEM GEBIET DER GEBIRGSSCHLAGBEKÄMPFUNG IM  
SÜDAFRIKANISCHEN GOLDERZBERGBAU UND DEREN ANWENDBARKEIT AUF  
ANDERE BERGBAUVERHÄLTNISSE**

von Horst Wagner

Das Auftreten von seismischen Ereignissen, die zu einer Erhöhung der Anzahl von gefährlichen Gebirgsschlägen führen, stellt ein sehr ernstes Problem beim Abbau tiefliegender Südafrikanischer Golderzlagerstätten dar. Gebirgsschläge oder Erdstöße dieser Art wurden bereits in den frühen Tagen der Abbautätigkeit im Bergbaurevier Witwatersrand genannt und erstmals um die Jahrhundertwende beobachtet. Mit zunehmender Teufe und Erstreckung der Bergwerksanlagen wurde auch das Gebirgsschlagproblem ernster.

Wie der nachstehenden Tabelle 1 entnommen werden kann, bilden heute die Gebirgsschläge bei der Vorrichtung der Goldbergbaue die größte Gefahr.

durchschnittliche jährliche Unfallziffer			
Dekade	Gesamtunfälle (je 1000 Beschäftigte*)	Gebirgsschläge und Steinfall	
		je 1000 Beschäftigte	% des Gesamten
1926-35	2,36	0,93	39,5
1936-45	1,68	0,74	44,1
1946-55	1,55	0,71	45,9
1956-65	1,44	0,72	50,1
1966-75	1,31	0,73	55,7

Tabelle 1: Tödliche Unfälle durch Steinfall und Gebirgsschläge in Relation zur Gesamtzahl an tödlichen Unfällen im Bergbau.

\*) Die Unfallzahl bezieht sich auf 1000 Beschäftigte und entspricht etwa 280.000 verfahrenene Schichten pro Jahr.

Die Anstregung, das Gebirgsschlagproblem zu bekämpfen, kann in zwei Zeitabschnitte unterteilt werden. Während der 1. Periode, welche mit den Vierzigerjahren zu Ende ging, verließen sich Goldbergbauindustrie und zuständige Regierungsstellen bei der Gebirgsschlagbekämpfung hauptsächlich auf die herkömmliche Vorgangsweise der Ingenieure: Beobachtung, Erfahrung und Schlußfolgerung gefolgt von praktischer Anwendung.

Die Berichte der ersten drei Regierungskommissionen, welche in diesem Zeitraum erstellt wurden, erbrachten einen Großteil des allgemeinen Verständnisses für Gebirgsschläge und mehrere ihrer Empfehlungen haben die Zeitprobe bestanden. Zum Beispiel wurde der Zusammenbruch von Abbaupfeilern als Ursache für viele der früheren bergbaubezogenen Erdstöße durch das "Ophirton Earth Tremor Committee" erkannt, welches seine Erkenntnisse im Jahre 1908 veröffentlichte. Das Überbauen von tonnlägigen Schächten und die Einführung von langfrontartigem Abbau wurden durch die in den Jahren 1915 und 1924 gegründeten Gebirgsschlagkomitees empfohlen.

In den frühen Fünfzigerjahren wurde erkannt, daß die rein praktischen Untersuchungen, das Gebirgsschlagproblem zu lösen, unzulänglich waren und daß ein wissenschaftliches Vorgehen notwendig ist. Im Jahre 1953 übernahm die Chamber of Mines die Förderung und Überwachung der gesamten Gebirgsschlagforschung. Anfänglich wurde diese Forschung durch ein Team von Wissenschaftlern aus dem Rat für Wissenschaft und Industrieforschung\*) ausgeführt. Später gründete die Chamber of Mines ihre eigene Bergbauforschungsabteilung und übernahm die Gesamtverantwortlichkeit.

Die Gebirgsschlagforschung, welche nun von der Forschungsorganisation der Chamber of Mines durchgeführt wird, kann sachgemäß in die folgenden Hauptgruppen unterteilt werden, nämlich die

- seismische Forschung,
- Entwicklung theoretischer Modelle hinsichtlich des Verhaltens des Gebirgsverbandes um Grubenbaue,

---

\*) Der Rat für Wissenschaft und Forschung (CSIR) ist eine staatlich gestützte Forschungsorganisation und beschäftigt etwa 3500 Wissenschaftler in verschiedenen Forschungszweigen.

- Weiterentwicklung und Anwendung von Gegenmaßnahmen,
- Weiterentwicklung und Anwendung von Schutzmaßnahmen,  
und
- Gebirgsschlagvorhersage.

Ziel dieser Ausführungen ist es, einige Ergebnisse dieser Forschungsarbeit hervorzuheben und ihre Anwendbarkeit für Gebirgsschlagprobleme in anderen Bergbaurevieren zu prüfen.

### 1. Notwendige Voraussetzungen für ein seismisches Ereignis

Aus einer detaillierten Studie über Zustandsänderungen der Energie, die durch die Bergbautätigkeit hervorgerufen werden, hat Salamon (1974, 1984) gezeigt, daß, wenn ein Grubenausbau in kleinen Schritten vorgetrieben wird, wie es die normale Vorgangsweise im Bergbau ist, sich die Umwandlung in potentielle Energie vollständig aus der Entspannung des Gebirges und der Verformung des Grubenausbaus ergibt.

$$\Delta W_t = \Delta U_c + \Delta W_s \quad (1)$$

dabei ist:

$\Delta W_t$  die Umwandlung in potentielle Energie,

$\Delta U_c$  die Änderung in Formänderungsarbeit für die Gebirgsmasse, welche die bergbaulichen Hohlräume umschließt

und  $\Delta W_s$  die durch die Deformation des Grubenausbaus verbrauchte Energie.

Daraus folgt, daß, wenn kein Bruch des Gebirges auftritt, die Ausweitung von unterirdischen Hohlräumen in kleinen Schritten ein quasistatischer, stetiger Prozeß ist, welcher sich nicht durch Freisetzen von seismischer Energie äußern kann. Folglich können die häufig beobachteten unterirdischen seismischen Ereignisse nur auf **Instabilitäten** beruhen, welche sich aus **tektonischen Schwächen** oder aus Bruchzonen im Gebirge ergeben.

In Übereinstimmung mit Drucker (1964) gilt als ausreichende Bedingung für stabiles Materialverhalten, daß

$$\delta \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} > 0 \quad (2)$$

worin  $\delta \sigma_{ij}$  und  $\delta \epsilon_{ij}$  irgendwelche unendlich kleine Spannungsänderungen bzw. die entsprechenden Dehnungsänderungen sind. Wenn ein Material die Ungleichung (2) erfüllt, fordert der Gleichgewichtszustand in **jedem** Fall, daß so ein Material stabil bleibt. Dies ist z.B. für das Gebirgsverhalten vor dem Bruch der Fall. Für das Eintreten eines seismischen Ereignisses ist demnach ein Bruchvorgang im Gebirge notwendig. Dieser Bruch kann entweder mit tektonischen Schwächen verknüpft oder durch zu hohe Belastungen verursacht werden.

Die daraus entstehenden Fragen kann man am besten am Beispiel eines Gesteinsblocks erklären, der auf einer rauhen Fläche liegt und auf welchen eine Normalkraft  $N$  sowie eine Tangentialkraft  $T$  wirken. Für letztere wird angenommen, daß sie über eine elastische Feder wirkt, die eine Federkonstante  $k$  besitzt. Das System wird solange in stabilem Gleichgewicht sein, solange

$$T - \mu_s N < 0 \quad \text{ist.} \quad (3)$$

Dabei ist  $\mu_s$  der Koeffizient der ruhenden Reibung. Wenn die Normalkraft  $N$  auf den Block wirkt kann die Tangentialkraft  $T$  allmählich erhöht werden, ohne den Block zu bewegen, solange die Ungleichung (3) erfüllt ist. Wenn nun  $T = \mu_s N$ , ist das System in einem instabilen Gleichgewicht und der Block wird in Bewegung geraten, wenn entweder die Tangentialkraft  $T$  geringfügig zunimmt oder die Normalkraft  $N$  abnimmt. Beginnt sich der Block zu bewegen, wird der kleinere, Gleitreibungskoeffizient  $\mu_d$  wirksam. Als Folge davon wird der Block mit der Masse  $M$  durch die Kraft mit dem Anfangswert  $(\mu_s - \mu_d) \cdot N$  beschleunigt und gewinnt an kinetischer Energie. Es soll festgehalten werden, daß die unmittelbar vor der Bewegung des Blocks in der Feder gespeicherte Formänderungsarbeit durch folgende Beziehung gegeben ist:

$$U_{\max} = \mu_s^2 N^2 / 2k \quad (4)$$

Die nach der Zeit  $t$ , vom Beginn der Bewegung an gemessene, in der Feder aufgespeicherte Energie, beträgt

$$U = U_{\max} [\psi + (1-\psi) \cos \alpha t]^2$$

worin  $\psi = \mu_s / \mu_d$  und  $\alpha^2 = k/M$  (5)

Die kinetische Energie,  $W_k$ , des beschleunigten Blocks, nach der Zeit  $t$ , ist durch folgenden Ausdruck gegeben

$$W_k = U_{\max} (1-\psi)^2 \sin^2 \alpha t. \quad (6)$$

Ein Teil der freigesetzten Energie wird infolge der Reibung in Wärme umgewandelt. Diese Wärmeenergie ist gegeben durch:

$$W_h = 2U_{\max} \psi (1-\psi) \cdot (1-\cos \alpha t) \quad (7)$$

Die Quelle beider, nämlich der kinetischen und der Wärmeenergie, ist die freigesetzte Formänderungsenergie, das heißt

für alle Werte von  $t$  ist

$$U_{\max} - U = W_k + W_h \quad (8)$$

Zwei wesentliche Folgerungen können aus diesem einfachen Beispiel gezogen werden, nämlich:

- Eine Instabilität in der Form eines seismischen Ereignisses kann durch die **kleinsten Veränderungen** in den Belastungen ausgelöst werden, wenn eine einzige Stelle im Gebirge besteht, die am Rande eines instabilen Gleichgewichtes ist.
- Die der Gebirgsmasse während der Ausbreitung eines seismischen Ereignisses mitgeteilte kinetische Energie wird **durch die Verformungsenergie**, die im Gebirge im Epizentrum des Ereignisses gespeichert ist, bestimmt.

Die Quelle dieser Formänderungsenergie kann zum Teil geologischen Ursprungs sein, im wesentlichen ist sie jedoch auf die durch die Abbautätigkeit verursachten Beanspruchungen des Gebirgsverbandes zurückzuführen.

Um ein größeres seismisches Ereignis auszulösen, müssen gleichzeitig drei Bedingungen erfüllt sein, nämlich:

- Es muß ein Zustand herrschen, der einem **instabilen Gleichgewicht** nahe ist.
- Es muß eine **Spannungsänderung** vorhanden sein, die das Ereignis auslöst.
- Es muß ein **wesentlicher Betrag an gespeicherter Energie in jenem Gebirgsbereich** vorhanden sein, in dem die Instabilität eintritt.

## 2. Instabile Gleichgewichtszustände

Ein System ist im Gleichgewicht, wenn seine potentielle Energie einen stationären Zustand aufweist. Ob der Gleichgewichtszustand "stabil" oder "instabil" ist, hängt davon ab, ob dieser Wert ein **Minimum** oder ein **Maximum** ist. Dies muß betont werden, da zusätzliche äußere Arbeit gebraucht wird, um ein System eines stabilen Gleichgewichtszustandes in Bewegung zu setzen, während Energie aus dem System durch Erregen eines instabilen Gleichgewichts frei wird.

Abbildung I:

Wie bezüglich Drucker (1964) früher ausgeführt wurde, ist ein Kontinuum stabil, wenn  $\delta \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} > 0$  ist. Materialien mit plastischem Arbeitsverhalten fallen in diese Kategorie. Materialien und Gefügestrukturen, die ein sprödes Verhalten aufweisen, sind in der Regel instabil. In diesen Fällen bestimmen die Entlastungskennlinie des Belastungssystems und der Festigkeitsabbau der belasteten Struktur, ob der Bruchvorgang stabil oder instabil ist. Bei Vorliegen eines Materials, das ein nur geringfügiges arbeitsdämpfendes Verhalten aufweist und einem Belastungssystem mit hohem Entspannungsmodul wird exogene Energie verlangt, um einen weiteren Bruch auszulösen, d.h. dieses System ist stabil. Das Gegenteil trifft für Materialien mit einem hohen arbeitsdämpfenden Verhalten und einem "weichen" Belastungssystem zu. Typische Beispiele für potentiell instabile Zustände sind nachgiebige Pfeiler, Brüche fester Dachschichten, durch den Abbau hervorgerufene Brüche an Abbaustößen, die Verschiebung entlang geologischer Verwerfer und Flözvorschübe.

Daraus geht hervor, daß seismische Vorgänge nicht durch einen einzelnen Mechanismus ausgelöst werden, sondern durch viele verschiedenartige Vorgänge hervorgerufen werden können.

### 3. Spannungsänderung

Es wurde schon früher ausgeführt, daß das Auftreten instabiler Gleichgewichtszustände im Gebirge in der Regel mit dem Vorliegen bereits vorher vorhandener Brüche oder Störungen verknüpft ist. Ursprung, Größe, Verhalten und Verteilung dieser Brüche sind aber unterschiedlich. Durch den Bergbau hervorgerufene Brüche im Gesteinsverband neigen dazu, sich im unmittelbaren Bereich der Abbaue zu konzentrieren, wo die Spannungsverhältnisse für einen Gesteinsbruch am günstigsten sind. Geologische Störungen neigen dazu, eher gleichförmig im Gesteinsverband verteilt zu sein, aber es besteht oft eine sehr starke Neigung zur Anisotropie. Zum Zwecke dieser Betrachtung soll angenommen werden, daß Größe, Verhalten und Verteilung der Brüche Zufallsvariable sind. Dies bedeutet, daß die Anzahl dieser Brüche je Volumseinheit, welche infolge einer bestimmten Spannungsänderung zu einer Instabilität führen, auch eine Zufallsvariable darstellt und erwartet werden kann, daß ihr Wert steigt, wenn die Amplitude der auslösenden Belastungsstörung angewachsen ist.

Zwei wichtige Schlußfolgerungen ergeben sich aus diesem einfachen Modell, nämlich:

Die erwartete Frequenz von seismischen Ereignissen steigt, wenn

- die induzierte, in einem Gebirgsbereich vorhandene **Störung des Spannungszustandes wächst,**

und wenn

- das **Volumen des Gebirges,** welches einem gegebenen Störungspegel ausgesetzt wird, **zunimmt.**

Die Größe der Spannungsänderung, die mit dem schrittweisen Abbaufortschritt verbunden ist, wird im wesentlichen durch das Ausmaß der Spannungen, welche an den Abbaustößen wirken, bestimmt und verringert sich mit der Entfernung von den ab-

zubauenden Flächen. Im Falle der flözartigen Grubenbaue ist die am Abbaustoß wirkende durchschnittliche Spannung nach Deist (1974) gegeben durch

$$\sigma_{\text{rms}} = Q_{33} (2 \pi l/h_m)^{1/2} \quad (9)$$

worin

- $Q_{33}$  die Vertikalkomponente des einfachen Spannungstensors,
- $l$  die halbe Spannweite des untertägigen Hohlraumes und
- $h_m$  die abgebaute Mächtigkeit bedeuten.

Im Falle eines sehr ausgedehnten Grubenbetriebes, wie er bei tiefen Goldbergwerken des Witwatersrand ausgeführt wird, wird der Maximalwert von  $\sigma_{\text{rms}}$  beim Eintreten totaler Konvergenz in den vorhandenen Grubenräumen erreicht.

Der Maximalwert der Durchschnittsbelastung am Ortsstoß eines parallellaufenden Langfrontabbaus tritt auf, wenn  $l = \infty$  ist. In diesem Grenzfall ist

$$\sigma_{\text{rms}} = Q_{33} \cdot (8 l_c/h_m)^{1/2} \quad (10)$$

wobei  $l_c$  die halbe Spannweite ist, bei welcher sich die hangenden und die liegenden Schichten des bergbaulichen Hohlraums zum erstenmal berühren.

$$l_c = h_m G / 2(1-\nu) Q_{33} \quad (11)$$

worin  $G$  die Steifigkeitszahl der Gesteinsschichten und  $\nu$  die Poissons'sche Zahl bedeuten.

Es muß betont werden, daß die Gleichungen (9) bis (11) ein elastisches Gebirgsverhalten voraussetzen und eine Schichtenauflockerung nicht berücksichtigen.

Die Bedeutung der Größe der Spannungsänderung für das Auslösen von seismischen Ereignissen kann anhand des Beispiels eines offenen parallellaufenden Langfrontabbaues dargestellt werden. Im vorliegenden Fall wird angenommen, daß ein Abbaustoß vorgetrieben wird, während der andere Abbaustoß statio-

när ist. Infolge des offenen Abbauhohlraumes und der Abbaugesometrie sind die an beiden Abbaustößen wirkenden Spannungen identisch. Betrachtet man jedoch die Spannungsänderungen in einer Entfernung von  $\Delta x$  von den ursprünglichen Abbaustößen, so zeigt sich, daß bedeutende Unterschiede zwischen dem stationären und dem fortschreitenden Abbaustöß bestehen.

Salamon (1983) hat die durch den Bergbau hervorgerufene Spannungsänderung  $\epsilon_{(i)}$  für den sich bewegenden (m) und stationären (s) Abbaustöß berechnet. Des Vorteils wegen wurden die induzierten Spannungsänderungen hinsichtlich  $Q_{33}$  normalisiert.

$\Delta x/l$		0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
$\epsilon_{(i)}/Q_{33}$	bewegt	3,572	1,244	0,438	0,237	0,153	0,109
	ruhend	0,0175	0,0123	0,0086	0,0069	0,0059	0,0052
Verhältnis		201,0	101,0	51,0	34,3	26,0	21,0

$$\Delta l/l = 0,01$$

Tabelle 2: Die Spannungsänderungen beim stationären Abbaustöß sind sehr gering, das Gebirge erfährt jedoch vor dem fortschreitenden Abbaustöß bedeutenden Spannungsänderungen.

Auf Basis des Wahrscheinlichkeitsmodells, welches früher vorgestellt wurde, ist die Frequenz der zu erwartenden seismischen Ereignisse von der Größe der Spannungsänderung und dem einem gewissen Störungspegel ausgesetzten Gesteinsvolumen abhängig. Daraus folgt, daß die Wahrscheinlichkeit des Auslösens eines seismischen Ereignisses am fortschreitenden Abbaustöß bedeutend größer ist als jene am ruhenden Stoß,

weil nicht nur die Größe der durch den Bergbaubetrieb hervorgerufenen Spannungsänderungen größer ist, sondern auch das einer Spannungsänderung unterworfenen Gebirgsvolumen mit dem fortschreitenden Abbaustoß anwächst. Aus dieser ganz allgemeinen Betrachtung kann geschlossen werden, daß

1. der Pegel der Seismizität bei fortschreitenden (aktiven) Abbaustößen bedeutend größer sein wird, als jener gleichartiger aber stationärer Stöße, und
2. infolge der zwar geringen jedoch vorhandenen Spannungsänderungen am stationären Abbaustoß die Möglichkeit von seismischen Ereignissen in diesem Bereich nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann.

Diese allgemeinen Schlüsse werden durch die Ergebnisse vieler seismischer Untersuchungen bestätigt. Einer der best-dokumentierten Fälle ist eine Studie von Salamon und Wagner über die Wirkung von Stabilitätsfesten als Sicherheitsmaßnahme gegen Gebirgsschläge. In dieser Studie wurde herausgefunden, daß der Pegel der Seismizität an Abbaustößen durch diese Festen kontrolliert werden konnte, aber einige seismische Ereignisse auch im Bereich der stationären Bergfesten auftraten, welche mehrere Hunderte von Metern vom aktiven Abbaubereich gelegen waren.

Bereich	Seismische Ausstrahlung $\text{kJ/m}^2$ / Monat	Relative Intensität
Ungeschützte Ortsstöße (3, 4 und 5)	11	1
Geschützte Ortsstöße (1 und 2)	5	0,45
Bergfesten (stationär)	0,15	0,014

Abbildung 2, Tabelle 3

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Größe der durch den Bergbau hervorgerufenen Spannungsänderungen als Maß für die Frequenz der seismischen Ereignisse gesehen werden kann, jedoch kein Maß für die Größe dieser Ereignisse selbst ist, da einige der sehr großen Ereignisse auch durch sehr kleine Spannungsänderungen ausgelöst werden können.

#### 4. Ursache der seismischen Energie

In der allgemeinen Diskussion wurde festgestellt, daß die Ursache der seismischen Energie entweder geologischen Ursprungs ist oder in erhöhtem Maße durch die Verformung des Gebirges als Folge der Abbautätigkeit hervorgerufen wird. Es gibt hier viele Beispiele, die seismische Ereignisse mit geologischen Erscheinungen oder Gesteinseigenschaften in Zusammenhang bringen. Abgesehen von tektonischen Spannungen als eine der augenfälligsten Energiequellen für seismische Ereignisse können Gesteinseigenschaften eine wichtige Rolle spielen, soweit die Speicherung der Verformungsenergie hiervon betroffen ist. Es wird öfters beobachtet, daß bestimmte Arten von seismischen Ereignissen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Vorhandensein von massiven standfesten Schichten gebracht werden, welche sich andererseits in einem gebirgigen Gebirge befinden.

Ein wichtiger Faktor für das Verstehen der durch den Bergbau verursachten seismischen Ereignisse sind die durch Bergbautätigkeit hervorgerufenen Energieänderungen. Diese wurden im Detail durch Salamon (1974, 1984) studiert und nur die bedeutendsten Ergebnisse sollten hier behandelt werden.

Im Verlaufe der Ausweitung eines Hohlraumes wird Energie verfügbar, die Arbeit verrichten kann. Die Quellen dieser Energie sind die Änderungen der potentiellen Energie  $W$ , und die Verformungsenergie  $U_m$ , die sich in dem abgebauten Gebirgsvolumen befand. Daraus folgt, daß die verfügbare Gesamtenergie  $W+U_m$  ist.

Bei der Ausweitung eines Hohlraumes wird das den Hohlraum umschließende Gebirge weiterhin beansprucht und ein Betrag,  $U_c$ , der verfügbaren Gesamtenergie wird als Verformungsenergie gespeichert.

Weiters wird eine bestimmte Energiemenge,  $W_S$  durch die Verformung des Ausbaus aufgebraucht. Wenn man annimmt, daß das Gebirge ein elastisches Kontinuum darstellt, kann keine Energie durch Bruch oder nichtelastische Verformung aufgebraucht werden. Daraus folgt, daß die während des Erweiterns des Hohlraumes verbrauchte Energie gleich  $(U_C + W_S)$  ist.

Die Zunahme an Energie, die bei der Verformung des Gebirges und Ausbaus verbraucht wurde, kann nicht größer sein, als die verfügbare Gesamtenergie. Weil der im abgebauten Gebirgsbereich enthaltene Energiebetrag  $U_m$  nicht für eine Verformung des Gebirges oder des Ausbaus zur Verfügung steht, muß folgende Ungleichung erfüllt werden:

$$W \geq U_C + W_S \quad (12)$$

Weil  $U_m > 0$  ist, folgt daraus, daß

$$(W + U_m) > (U_C + W_S) \quad \text{ist.} \quad (13)$$

Der fehlende Energiebetrag, welcher benötigt wird, um das Energiegleichgewicht herzustellen, wird als "Entlastungsenergie",  $W_R$ , bezeichnet. Auf der Basis von (12) und (13) geht hervor, daß

$$W_R = (W + U_m) - (U_C + W_S) > 0 \quad (14)$$

und daß

$$W_R \geq U_m > 0 \quad \text{ist.} \quad (15)$$

Daraus folgt, daß die Vergrößerung eines bergbaulichen Hohlraums immer mit einer gewissen Freisetzung an Energie verbunden ist, die in irgendeiner Weise verbraucht werden muß.

Würde ein gesamter Abbauhohlraum in einem einzigen plötzlichen Arbeitsgang hergestellt, käme es zu Schwingungen im Gebirgsverband. Die kinetische Energie  $W_k$ , die aus diesem Vorgang resultiert, würde durch einen Dämpfungsvorgang abgebaut werden, was durch im Gebirge vorhandene Schwachstellen bewirkt wird. Da es aber keine andere Art des Energieverbrauches gibt, folgt aus (15), daß

$$W_Y = W_K + U_m \quad (16)$$

und aus (14),

$$W_K = W - (U_C + W_S) \quad \text{ist.} \quad (17)$$

Salamon (1983) hat gezeigt, daß die Ausweitung bergbaulicher Hohlräume in kleinen Stufen ein quasistatischer, stabiler Vorgang ist, welcher keine Freisetzung kinetischer Energie in das Gebirge ergibt und daher nicht die Quelle von seismischer Energie sein kann. Aus (16) folgt, daß, wenn  $W_K \rightarrow 0$ ,

$$W_Y = U_m \quad \text{ist.} \quad (18)$$

Die Energieänderungen, die mit der Vergrößerung bergbaulicher Hohlräume in kleinen Stufen verbunden ist, können wie folgt zusammengefaßt werden:

$$\Delta W = \Delta U_C + \Delta W_S$$

$$\Delta W_Y = \Delta U_m \quad \text{und}$$

$$\Delta W_K = 0 \quad (19)$$

Der Energiebetrag,  $\Delta W$ , welcher beim schrittweisen Abbau der Lagerstätte freigesetzt wird, ist gleich der Verformungsenergie im Gesteinsvolumen  $\Delta U_m$ , welches abgebaut wird.

Jahrelange Beobachtungen im Südafrikanischen Golderzbergbau haben ergeben, daß der auf die Abbaufächeneinheit bezogene Energiefreisetzungsbetrag (Energy Release Rate - ERR gemessen in  $\text{MJ/m}^2$ ) ein gutes Maß für die Beurteilung der Gebirgsschlaggefahr ist. Die Energy Release Rate ist nicht nur ein Maß für die mit dem Abbau flözartiger Lagerstätten verbundenen Spannungsänderungen, sondern auch der im Bereich des Abbaustoßes gespeicherten Verformungsenergie. Diese Kennzahl erfaßt demnach zwei der für das Auftreten von seismischen Ereignissen notwendigen Voraussetzungen.

Eine Reihe von digitalen und analogen Rechenverfahren wurden in den letzten zwei Jahrzehnten entwickelt, die es ermöglichen, die ERR auch im Falle unregelmäßiger Abbaugeometrien

zu berechnen. Die bekanntesten dieser Verfahren sind der elektrische Widerstandsanalogrechner und das digitale MINSIM Rechenprogramm.

Für die einfachste Abbaugeometrie, nämlich die eines parallellaufenden Strebs, kann die ERR analytisch abgeleitet werden. Drei Extremfälle können unterschieden werden, nämlich

- (1) offener Abbauhohlraum ( $l < l_c$ ),
- (2) Auftreten der ersten totalen Konvergenz im abgebauten Bereich ( $l=l_c$ ), und
- (3) weitflächig abgebauter Bereich ( $l \rightarrow \infty$ )

Die Gleichungen in (20) geben den Zusammenhang zwischen ERR, der Abbauspannweite,  $2l$ , der abgebauten Mächtigkeit  $S_m$ , und der Vertikalkomponente des Gebirgsdruckes  $Q_{33}$ .

$$\begin{aligned} (1) \quad l < l_c \quad \Delta W_R &= \pi(1-\nu) \cdot l Q_{33}^2 / 2G \\ (2) \quad l = l_c \quad W_R &= \frac{\pi}{4} S_m \cdot Q_{33} \\ (3) \quad l \rightarrow \infty \quad W_R &= S_m \cdot Q_{33} \end{aligned} \quad (20)$$

Aus (20) folgt, daß die ERR zunächst linear mit der Abbauspannweite zunimmt. Nach dem Eintreten totaler Konvergenz im Alten Mann wird die ERR im wesentlichen nur noch von der abgebauten Mächtigkeit  $S_m$ , und dem Gebirgsdruck  $Q_{33}$ , beeinflußt.

Da die Teufe des Abbaues, welche den  $Q_{33}$ -Wert bestimmt, vorgegeben und es das Bestreben des Bergbaus ist einen möglichst großen Bereich der Lagerstätte abzubauen, d.h. die Spannweite  $l$  im allgemeinen groß ist, folgt daraus, daß die Kontrolle der Konvergenz im Alten Mann die wichtigste Maßnahme für die Kontrolle der ERR ist. Abgesehen von der Kontrolle der abgebauten Mächtigkeit  $S_m$ , kann das Ausmaß der wirksamen Konvergenz im Alten Mann durch das Einbringen von hochwertigem Bergeversatz beeinflußt werden. Eine weitere

und sehr wirksame Kontrollmaßnahme ist der Teilabbau. In diesem Falle werden 20 bis 50 m breite Stabilitätsfesten in Abständen von 100 bis 200 m zur Unterstützung des überlagernden Gebirges stehen gelassen. Die Erfahrungen zeigen, daß bei einem Lagerstättenausnutzungsgrad von 80 % der Betrag der ERR auf weniger als ein Viertel des dem Totalabbau entsprechenden Wertes reduziert werden kann.

Ziel aller Kontrollmaßnahmen ist es, den mit dem Abbau der flächenartigen Golderzlagerstätten verbundenen Energiefreisetzungsbeitrag auf etwa  $30 \text{ MJ/m}^2$  zu begrenzen. Dieser Betrag wird beim Totalabbau eines 1 m mächtigen Flözes in einer Teufe von etwa 1100 m erreicht. Ähnliche ERR-Werte können bei ungünstiger Abbaugeometrie bereits in geringerer Teufe auftreten. Ein typisches Beispiel wäre der Abbau eines Restpfeilers.

Aus den obengenannten Ausführungen folgt, daß viele der im Südafrikanischen Golderzbergbau gewonnenen Erfahrungen auf dem Gebiet der Gebirgsschlagbekämpfung auf den Abbau großflächiger flözartiger Erzlagerstätten in großer Teufe beschränkt bleiben werden. Die Grundvoraussetzungen für das Auftreten von Gebirgsschlägen haben jedoch allgemeine Gültigkeit und können nutzbringend bei der Analyse von Gebirgsschlagproblemen angewendet werden.

## 5. Schlußfolgerungen

Ziel dieser Abhandlung war es zu zeigen, daß die Seismizität in tiefen Goldgruben auf ein paar grundlegende Prinzipien zurückgeführt werden kann und daß die vielen verschiedenen Typen von seismischen Ereignissen und in tiefen Gruben auftretenden Gebirgsschläge lediglich unterschiedliche Folgeerscheinungen der gleichen Prinzipien darstellen. Bei sorgsamer Untersuchung der grundlegenden Tendenzen der Parameter, durch welche die Seismizität bestimmt wird, ist es möglich, die wesentlichsten Ursachen des Problems zu erkennen und über die zielführendsten Maßnahmen zu entscheiden, um die schädlichen Auswirkungen zu vermindern. Weil seismische Ereignisse durch Instabilitäten verursacht werden, die ihrem Wesen nach zufallsverteilt sind und sogar

durch die kleinsten vom Bergbau hervorgerufenen Spannungsänderungen ausgelöst werden können, kann diese Gefahr für einen Bergbau nicht voll ausgeschlossen werden. Durch Erkennen der Ursachen dieser Ereignisse und durch Ergreifen der richtigen Kontrollmaßnahmen kann das Risiko jedoch auf ein erträgliches Maß reduziert werden.

**Literatur:**

Drucker, D.C.: On the postulate of stability of material in the mechanics of continua.- Journal de Méchanique 3, 235-249, 1964

Salamon, M.D.G.: Rock mechanics of underground excavations. Advances in Rock Mechanics.- Proceedings of the 3rd Congress, Int.Soc. of Rock Mechanics, Denver Colorado 1/B, 951-1099, Washington 1974

Salamon, M.D.G.: Rockburst hazard and the fight for its alleviation in South African gold mines.- Rockbursts: prediction and control. Trans.Instn.Min.Metall. (Sect. A: Min.industry) 93, 11-36, 1984

Salamon, M.D.G. and Wagner, H.: Role of stabilizing pillars in the alleviation of rockburst hazard in deep mines.- Proceedings of the 4<sup>th</sup> congress, Int.Soc. of Rock Mechanics, Sept. 1979 Montreaux 2, 561-566, Balkema, Rotterdam 1979.

Wagner, H.: Die Bedeutung der Gebirgsmechanik für den Abbau tiefer Lagerstätten.- Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 126, 513-521, Wien 1981.

BEISPIEL POTENTIELLER INSTABILITÄT

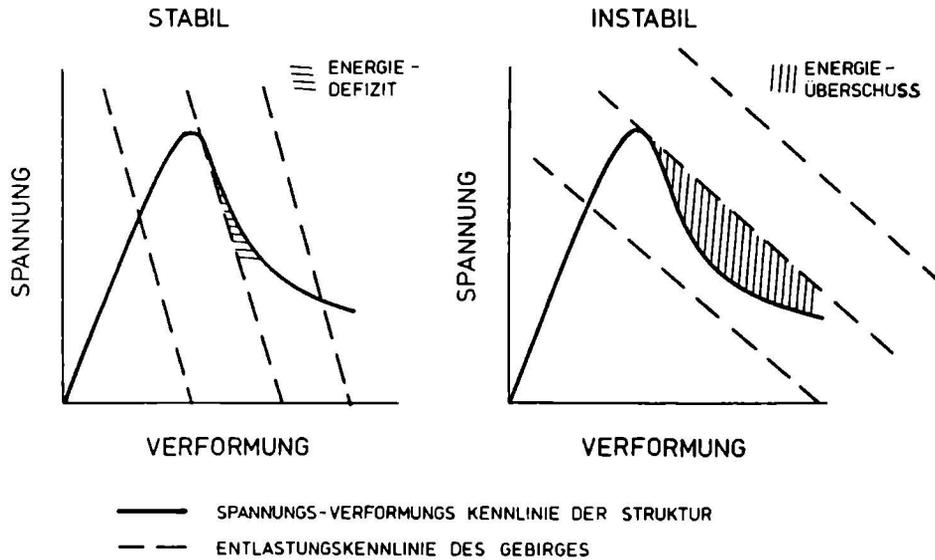


Abb. 1: Beispiel potentieller Instabilitäten. Die Neigung der Entlastungskennlinie des Gebirges ist entscheidend, ob eine potentiell instabile Struktur stabil oder instabil zu Bruch geht.

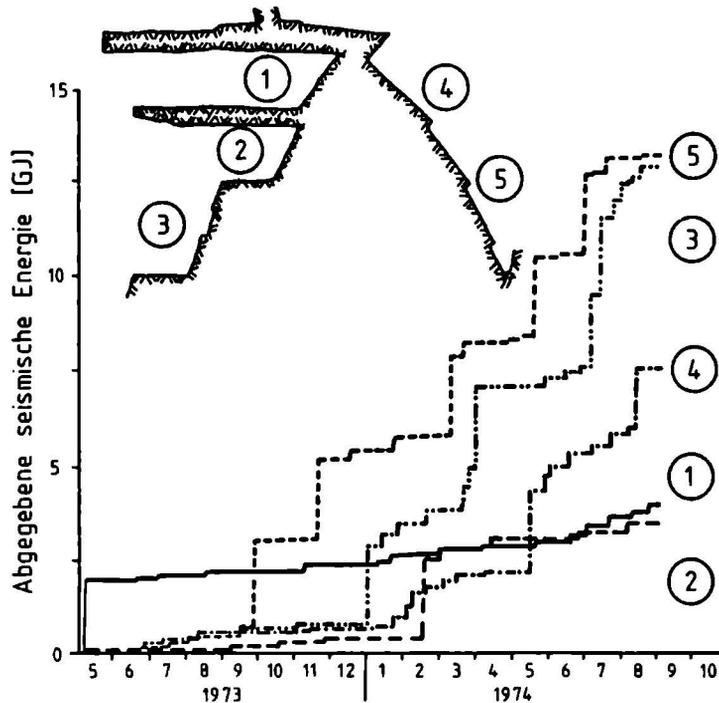


Abb. 2: Einfluß von Stabilitätsfesten auf die seismische Aktivität in einem tiefen Goldbergwerk (Abbauteufe 3100 m).

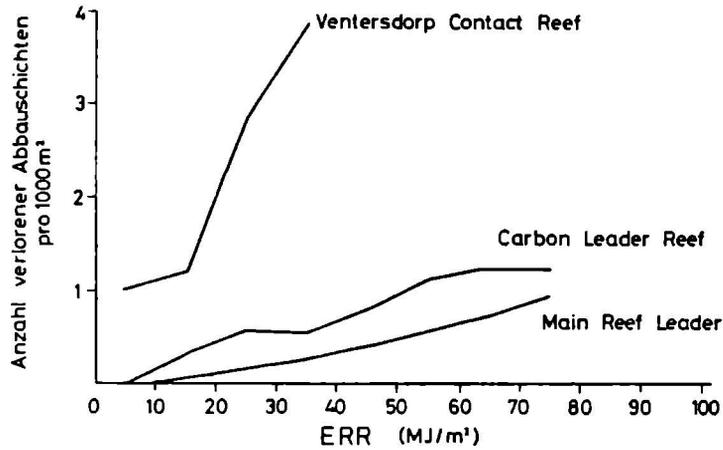


Abb. 3: Zusammenhang zwischen der Energieentlastungsrate (ERR) und der Anzahl der durch Gebirgsschläge verlorenen Abbauschichten je 1000 m<sup>2</sup> abgebauter Fläche.

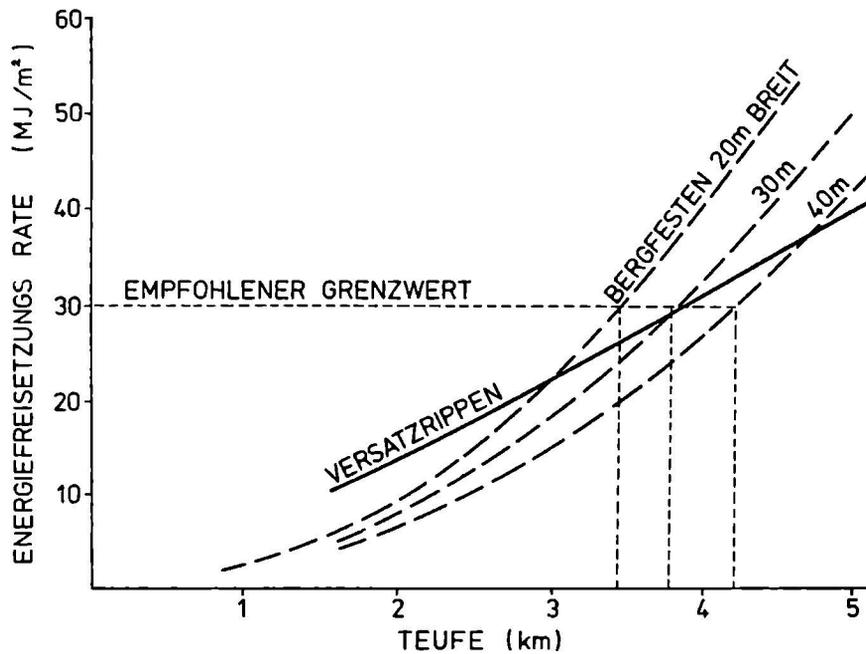


Abb. 4: Vergleich der Wirksamkeit von hochwertigen Bergeversatzrippen und Stabilitätsfesten als Maßnahmen zur Kontrolle der ERR. Die Stabilitätsfesten haben einen Abstand von 200 m und sind kontinuierlich. Im Falle der Bergeversatzrippen sind 40 % der abgebauten Fläche versetzt.

## DISKUSSION

### H. Habenicht:

Nach den Darstellungen des Vortrags ergibt sich, daß die Abbaugeschwindigkeit und besonders die momentane stufenweise Lösung des Gebirges bei der Gewinnung die Gebirgsschlaggefahr erhöht. Die Neigung zum Gebirgsschlag wird theoretisch Null, wenn die Abbaufont nicht fortschreitet, da dann die Energy Release Rate klein bleibt. Wie sollte man also praktisch einen Abbau führen?

### H. Wagner:

Seismische Veränderungen des Gebirges durch Schießen gehen in ca. 8 Stunden zurück. In Versuchabbauen wurde eine kontinuierliche mechanische Gewinnungsmethode erprobt, hiebei hat sich gezeigt, daß die Zahl der Gebirgsschläge etwa gleich hoch wie bei Abbau durch Schießen ist. Unterschiedlich ist jedoch, daß die Gebirgsschläge während der Gewinnungstätigkeit auftreten, während beim Schießbetrieb die Mehrzahl der Gebirgsschläge zu einem Zeitpunkt auftreten, wo die Arbeitsörter unbelegt sind.

Beim kontinuierlichen Abbau ist eine größere Gefährdung der Belegschaft, die sich ja längere Zeit vor Ort aufhält, gegeben. Aus diesen Gründen, sowie Gründen des Schutzes der Bergbauausrüstung, ist es entscheidend, daß die Gebirgsschlaggefahr durch regionale Stabilisierungsmaßnahmen wie z.B. Stabilitätsfesten oder Versatz verringert wird.

### R. von Velsen-Zerweck:

Ergänzend sei über den Vortrieb einer Flözstrecke mit einer Teilschnittmaschine berichtet. Hierdurch sind größere Spannungen im Nebengestein aufgetreten, die sich mitunter durch ein heftiges Abplatzen von faust- bis kindskopfgroßen Steinen äußerten. Beim Schießbetrieb hingegen wurde das Gebirge gleichsam durchgeschüttelt und so konnten bei dieser Art Erschütterungs- oder Entspannungssprengen gefährliche Spannungen teilweise abgebaut werden.

**S. Polegeg:**

Wird in Untertagebergbauen in erdbebengefährdeten Gebieten die Gebirgsschlaggefahr durch die Erdbebentätigkeit vermindert?

Bewirken häufige Beben eine ähnliche Entspannungswirkung für das Gebirge wie man sie künstlich durch Schießen herbeiführt?

**H. Wagner:**

Allgemein kann festgestellt werden, daß unter sonst gleichen Bedingungen (Gesteinstyp, Abbaugeometrie und Abbauteufe, etc.) die Gebirgsschlaggefahr in Erdbebengebieten höher sein wird als in tektonisch "ruhigen" Bereichen. Der Grund hierfür ist im Grenzgleichgewicht zu sehen. Bereits geringfügige Veränderungen des Spannungszustandes im Gebirge können zu seismischer Aktivität und Gebirgsschlägen führen. Zusätzlich ist infolge der hohen tektonischen Spannungen und der damit verbundenen großen gespeicherten Energie mit schwereren Gebirgsschlägen zu rechnen.

Da Erdbebentätigkeit temporär zum Spannungsabbau führt, kann angenommen werden, daß die Gebirgsschlaggefahr nach größeren Beben temporär abnimmt. Infolge der mit den Erdbeben verbundenen Spannungsumlagerungen kann es jedoch in Einzelfällen zu einer Erhöhung der Gebirgsschlaggefahr kommen. Dies ist dann der Fall, wenn der Bergbau durch ein Erdbeben in eine Situation höherer Gebirgsspannungen gerät. Im allgemeinen wird dies für Bergbaugebiete gelten, welche im Randbereich von Erdbebengebieten liegen. Aus Südafrika sind Fälle bekannt, wo schwere Gebirgsschläge wenige Tage nach lokalen Erdbeben ( $M = 5$ ) aufgetreten sind.