

Die Bedeutung geologisch-tektonischer Elemente im Gebirge für den Bergbau, dargestellt am Beispiel des Werra-Kalireviere der DDR

Peter Knoll, Arnold Schwandt und Klaus Thoma

*Institut für Bergbausicherheit, 703 Leipzig, Friederikenstrasse 60,
VEB Kombinat KALI, 54 Sondershausen, und Institut für Bergbausicherheit,
703 Leipzig, DDR*

ZUSAMMENFASSUNG

Der Abbau von Carnallitlagerstätten in Teufen um 1000 m erfordert sorgfältige Analysen des Spannungs- und Verformungszustandes im Gebirge als Grundlage für eine sichere Dimensionierung und eine den gegebenen geologischen und geomechanischen Bedingungen Rechnung tragende Abbauführung. Diese Erkenntnis hat die DDR seit vielen Jahren veranlaßt, umfangreiche wissenschaftliche Forschungen vor allem zur Wechselwirkung des geologisch-tektonisch kompliziert gebauten Deckgebirges mit dem sich entwickelnden Carnallitabbau durchzuführen. Zusammen mit einem wissenschaftlich begründeten Dimensionierungsverfahren und praxisbezogenen Anwendungsvorschriften für dieses Dimensionierungsverfahren stellen die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Untersuchungen die Grundlage für den sicheren Abbau der Carnallitlagerstätten dar. Sie erlauben es, den Abbau so zu lenken, daß abbaubedingte Spannungsumlagerungen im Gebirge berücksichtigt und beherrscht und Gefährdungen der Standsicherheit der Pfeiler und Abbauräume ausgeschlossen werden können. Abbaufremde Faktoren, die die geomechanische Verhaltensweise des Deckgebirges verändern und die Wechselwirkung zwischen Abbau und Deckgebirge stören, können jedoch die Sicherheit im Bergbau und u. U. auch die öffentliche Sicherheit erheblich beeinträchtigen. Diese Störfaktoren müssen beseitigt werden.

EINLEITUNG

Der Bergbau und seine Folgeaktivitäten stellen Eingriffe des Menschen in das natürliche Gleichgewicht des Gebirges dar. Als Ergebnis langzeitiger geologisch-tektonischer Vorgänge (endogene Prozesse) sowie von geologisch-exogenen Prozessen ist das Gebirge, d.h. die obersten Bereiche der Erdkruste, in einem Gleichgewichtszustand. Dieser Gleichgewichtszustand ist jedoch wegen der ständig anhaltenden tektonischen Vorgänge in der Erdkruste zeitlich begrenzt und stellt gewissermaßen einen Ausschnitt aus einer Kette aufeinanderfolgender und zeitlich begrenzter Gleichgewichtszustände dar. Der mechanische Zustand, in dem ein Gebirgsbereich heute anzutreffen ist, muß deshalb dem mechanischen Grenzzustand mehr oder weniger nahekommen. Die Annäherung an den Grenzzustand ist dabei örtlich unterschiedlich und hängt von den gegebenen lokalen Verhältnissen und von den Geschwindigkeiten ab, mit

denen sich die Materialtransporte und Abtragungsprozesse vollziehen.

Tätigkeiten des Menschen, die direkt das Gebirgsverhalten beeinflussen, wie Bergbau, Speicherungen im Gebirge und Injektionen von Flüssigkeiten in das Gebirge, Tunnel- und Talsperrenbau u.a. Aktivitäten, sind deshalb stets im Zusammenhang mit dem Verhalten des Gebirges zu betrachten und bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Stabilität des Gleichgewichtes im Gebirge zu bewerten. Für den Bergbau bedeutet das, daß nicht allein die Gebirgsteile im unmittelbaren Abbauhorizont, sondern die Wechselwirkung des Gebirges im Abbauhorizont mit der umgebenden Schichtenfolge, insbesondere mit dem Deckgebirge, betrachtet werden muß.

Voraussetzung dafür ist die möglichst genaue Kenntnis der geologischen Struktur, der mechanischen Spannungen sowie des Festigkeits- und Verformungsverhaltens im Ab-

bauhORIZONT und im umgehenden Gebirge. Am Beispiel des Kalibergbaus im Werra-Kalirevier der DDR soll diese Wechselwirkung dargestellt werden.

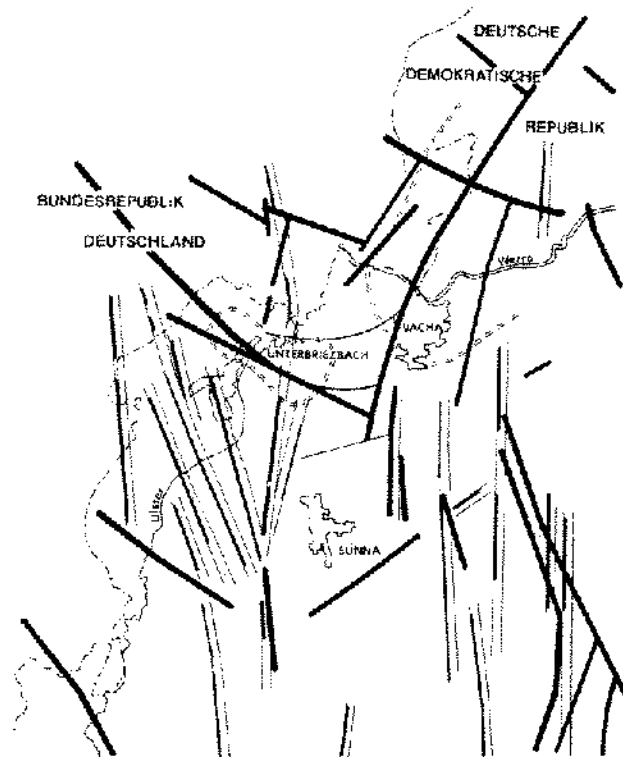
Geologisch-tektonischer Bau des Werra-Kalireviers der DDR. Der geologische Aufbau, die Schichtenfolge, des Deckgebirges und des Salinars im Werra-Kaligebiet und damit auch im Werra-Kalirevier der DDR ist durch zahlreiche Aufschlüsse in Form von Bohrlöchern und Schächten sehr gut bekannt. Es kann deshalb auf einschlägige Veröffentlichungen verwiesen werden [7]. Für den südwestlichen Teil des Werra-Kalireviers der DDR geht der stratigraphische Aufbau aus Figur 3 hervor.

Für gebirgsmechanische Untersuchungen sind aus geologischer Sicht bruchtektonische Elemente bzw. Zonen einschließlich ihrer Genese von besonderer Wichtigkeit. Unterschiedliche tektonische Beanspruchung des Gebirges führt zu einem reichhaltigen Inventar bruchtektonischer Erscheinungsformen in sehr unterschiedlicher Größenordnung. Für die Beurteilung der geomechanischen Verhaltensweise des Gebirges sind vor allem die räumliche Ausdehnung, die Anordnung und die Häufigkeit der Klüfte, Spalten und Störungen interessant. Die unterschiedliche Beanspruchung des Gebirges im Verlauf tektonischer Prozesse und der petrographisch stark wechselnde Aufbau des Gebirges bewirken einen wechselnden Grad der Durchtrennung und der Beschaffenheit klüftiger Gebirgsbereiche und der Störungszonen.

Neben relativ selbständigen Einzelelementen meist geringerer Ausdehnung (kleinere Brüche, Verwerfungen, Spalten) können im Werra-Kalirevier der DDR die Mehrzahl dieser tektonischen Erscheinungsformen zu größeren Systemen bzw. zusammengehörigen strukturellen Einheiten zusammengefaßt werden. Nach Ausbildung, Anordnung und Genese ist eine grundsätzliche Unterscheidung von Verwerfungsbrüchen und Zerrspalten mit teilweiser Basaltfüllung möglich. In Figur 1 sind die Störungszonen für den westlichen Teil des Werra-Kalireviers der DDR generalisiert dargestellt [12].

Bei der Gruppe der bruchtektonischen Störungen vom Typ der *Verwerfungsbrüche* handelt es sich um Verschiebungsflächen mit einem hohen Durchtrennungsgrad des Gebirges. An diesen Verwerfungen—im wesentlichen Abschiebungen—erfolgte die Scherverschiebung, d.h. das schräge Auseinandergleiten unter Ausweitung der durch diese Brüche getrennten Teilschollen bzw. Blöcke. Die vertikalen Versetzungen betragen bis zu 175 m.

Das Streichen reicht von herzynischer über rhönisch und rheinische bis zur flach-erzgebirgischen Richtung. Nicht selten treten die Bruchstrukturen als annähernd parallel verlaufende Graben- und Staffelfrühe auf [12]. Bei den Gräben und Tiefschollen zeigen die begrenzenden bruchtektonischen Zonen eine unterschiedliche Ausbildung. So stehen steiler einfallenden, relativ eng begrenzten Staffelfrühen flache, flexurartige Randstörungen gegenüber.



Figur 1. Bruchtektonische Zonen im südlichen Werra-Kaligebiet. Breite dunkle Linie = tektonische Zone mit Verwerfungscharakter (Abschiebungen u.a.). Doppelte, dunkle und helle Linie = tektonische Zone mit nachgewiesenen Basaltkörpern (Basaltspalten, Schöte u.a.). Dünne dunkle Linie = tektonische Zone, allgemein. Doppelte, punktierte Linie = Grenze der Subrosionssyncline. Strichpunktierte Linie = Staatsgrenze.

Zum Typ der Verwerfungsbrüche gehören solche seit langem bekannte Störungszonen wie das System der herzynisch streichenden Unterbreitzbacher Störungszone, welche mit der Unterbreitzbacher Subrosionssyncline zusammenfällt. Für die Urnshausen-Roßdorfer Störungszone im Südosten des Werra-Kalireviers konnte im Ergebnis geowissenschaftlicher Untersuchungen ihre Fortsetzung nach Nordwesten als Feldatal-Störungssystem nachgewiesen werden.

Die Gruppe der *Zerrspalten*, denen weitverbreitet jungtertiäre Vulkanite aufsitzen, sind bruchtektonische Beanspruchungszonen, die sich oft aus fiederförmig ausgebildeten Einzelspalten rhönischen, meridionalen und rheinischen Streichens zusammensetzen. Die staffelförmig angeordneten Einzelspalten besitzen eine Längserstreckung von einigen Metern bis über mehrere hundert Meter hinweg. Demgegenüber lassen sich die aus parallelscharigen Spalten aufgebauten bruchtektonischen Zonen über mehrere Kilometer Länge hinweg nachweisen. Neben einer annähernd parallelen Anordnung dieser langgestreckten Zonen (in der Literatur oft auch als "Basaltlinien" bezeichnet) sind divergierend-strahlenförmige Anordnungen nachgewiesen. Auf diesen vulkanitführenden Störungszonen fehlen in der Regel Verschiebungen. Lokal auftre-

tende Verstellungen beschränken sich auf den Dezimeter- bis Meterbereich. Entsprechend der Entstehung, der z.T. fiederförmigen und absetzigen Ausbildung dieser Störungen und der teilweisen Ausfüllung mit Basalt weist das Gebirge in diesen Bereichen einen anderen, geringeren Durchtrennungsgrad auf, als im Bereich der oben beschriebenen Verwerfungsbrüche.

Als Beispiele für die Gruppe der Zerspalten sollen beschrieben werden (Fig. 1): Das Spaltensystem Hubenberg-Ulsterberg-Eselskuppe ist in wesentlichen Teilen durch das Grubengebäude des Kalibergbaues gut aufgeschlossen. Untersuchungsergebnisse an der Tagesoberfläche ergänzen, wie im übrigen Untersuchungsgebiet auch, das Bild dieses Systems bruchtektonischer Zonen. Das dargestellte System ist charakterisiert durch das Divergieren von Spaltenzonen im Gebiet von Sünna. Die unterschiedlich langen Spaltenzüge im westlichen Teil weisen generell rhönisches Streichen auf. Demgegenüber zeigen die östlichen Teile, die sich bis zur Basaltbrekzie der Eselskuppe südlich Philippsthal (BRD) fortsetzen, vorwiegend rheinisches Streichen. Gleichzeitig mit dem Umschwenken der Streichrichtung der Spaltenzüge geht ein Wechsel im Streichen der Einzelspalten und ihrer Staffelung einher. Die in der Literatur beschriebene basaltische Störungszone Martinroda-Mäuseberg-Vitzeroda (östlich des in Figur 1 dargestellten Ausschnittes) setzt sich aus mehreren enger benachbarten, parallelverlaufenden und meridional streichenden Einzelspalten und Spaltenzügen zusammen. Dieses System zusammenhängender Spalten charakterisiert eine bruchtektonische Beanspruchungszone von mehr als 10 km Länge.

Zusammenfassend lassen sich aus der strukturgeologischen-tektonischen Analyse folgende Feststellungen ableiten:

Die Anordnung der bruchtektonischen Zonen läßt eine deutliche Abgrenzung einzelner Gebirgsblöcke bzw. -schollen unterschiedlicher Größe zu. Damit wird der Charakter des untersuchten Gebietes als Bruchschollenmosaik im bekannten Stilleschen Sinne deutlich.

Die bruchtektonischen Zonen, die die Bruchschollen bzw. Teilschollen begrenzen, lassen sich bezüglich ihrer Ausbildung im wesentlichen in zwei Hauptgruppen einteilen. Diese Struktur des Gebirges ist für sein geomechanisches und hydrogeologisches Verhalten von wesentlicher Bedeutung.

DER SPANNUNGSZUSTAND IM GEBIRGE

Da Spannungen nicht direkt meßbar sind, müssen sie mit relativ großem Meßaufwand und einer gewissen Meßunsicherheit über die Messung anderer Größen, die mit den Spannungen zusammenhängen, bestimmt werden. Die vielfach in der Gebirgsmechanik benutzten vereinfachten Lastannahmen (z.B. die Annahme des Gebirgsgewichtes als

einzigste Spannungsursache) entsprechen nur in den wenigsten Fällen den tatsächlichen Verhältnissen. Sie sind deshalb ohne kritische Überprüfung bzw. Bestätigung durch andere Informationen über die Wirkung der Spannungen nicht anwendbar. Aus diesem Grunde hat sich in der Gebirgsmechanik eine Verfahrensweise bei der Ermittlung von qualitativen und quantitativen Angaben über den Spannungszustand durchgesetzt und bewährt, die aus 1) geologisch-tektonischen Analysen des Gebietes, 2) seismologischen Untersuchungen, 3) geomechanischen und geophysikalischen Messungen am betrachteten Ort und dessen Umgebung, 4) Analysen des Verformungs- und Bruchverhaltens von Hohlräumen und Bergfesten im Gebirge und 5) Analysen von Bewegungsabläufen im Gebirge besteht.

Diese Verfahrensweise ist gegenwärtig die zuverlässigste Methode zur Bestimmung des realen Spannungszustandes. Sie wird international mit Erfolg angewandt und soll auch der Analyse des Spannungszustandes im Werra-Kalirevier der DDR zugrundegelegt werden.

Das Werra-Kalirevier ist im Zusammenhang mit der geologisch-tektonischen Situation Mitteleuropas zu betrachten. Es liegt in der Nordspitze der Süddeutschen Großscholle, an deren Rändern verbreitet seismische Ereignisse stattfinden (Rheingrabensystem).

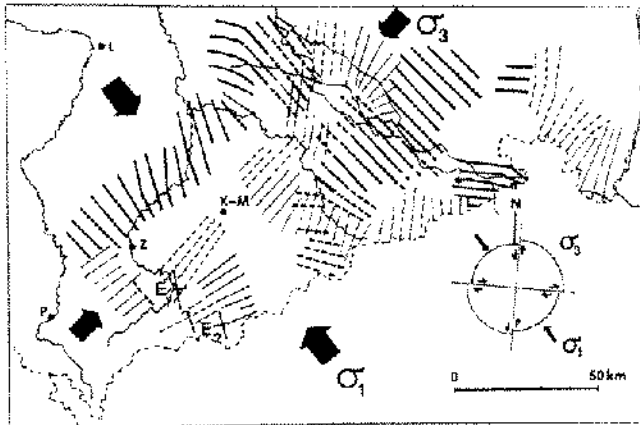
Man kann davon ausgehen, daß auf diese Großscholle über ihre Randzonen tektonische Kräfte einwirken, die innerhalb der Scholle einen vom petrostatischen Spannungszustand abweichenden Grundspannungszustand erzeugen.

Ergebnisse von Spannungsbestimmungen mit Hilfe von Bohrlochentlastungsmethoden durch Greiner [3], die Auswertung der seismologischen Registrierungen seismischer Ereignisse im Rhein-Grabensystem durch Ahmer [1], die direkten Spannungsbestimmungen in verschiedenen Bergbaurevieren der DDR [9] sowie die geodätischen Bewegungs- und Spannungsanalysen im Erzgebirgsraum [8] (s. Fig. 2) lassen den eindeutigen Schluß zu, daß im mitteleuropäischen Raum ein relativ homogenes Spannungsfeld besteht. In diesem Spannungsfeld ist die größte Horizontalspannung (Druck) näherungsweise NW-SE gerichtet.

Bezüglich der Beträge der Spannungsponenten wurden bei Hydrofac-Untersuchungen im Subsalinar des Werra-Kalireviers im Raum Gehaus und Wölferbütt folgende Werte für die horizontalen Komponenten des Spannungszustandes nach der von Haimson [4] angegebenen Verfahrensweise bestimmt (Verhältniszahlen).

TABELLE 1
Messungen

	1. Messung	2. Messung	3. Messung
σ_v	1	1	1
σ_{H1}	1,28	1,34	1,03
σ_{H2}	0,64	0,68	0,54
Meßteufe	840 m	780 m	805 m



Figur 2. Orientierung der maximalen (σ_1) und der minimalen (σ_3) horizontalen Druckspannungen im Südosten der DDR, ermittelt aus rezenten horizontalen Krustenbewegungen und direkten Spannungsbestimmungen (E_1 , E_2) s. Reference 8. L = Leipzig. P = Plauen, Z = Zwickau, K-M = Karl-Marx Stadt.

Der gesamte Spannungszustand im Deckgebirge des Werra-Kalireviers der DDR resultiert aus 1) der Beanspruchung durch das regionale Spannungsfeld in Mitteleuropa, 2) dem Eigengewicht der Schichtenfolgen des Gebirgsmassivs und aus 3) Zusatzspannungen, die durch bergbauliche Tätigkeit hervorgerufen werden.

Über die Bewertung dieses Spannungszustandes bezüglich des mechanischen Grenzzustandes im Gebirge geben seismologische Untersuchungen Auskunft. Das Werra-Kalirevier der DDR ist kein Gebiet mit hervortretender seismischer Aktivität. Meßtechnisch nachweisbare seismische Ereignisse geringer Magnitude weisen jedoch darauf hin, daß der Spannungszustand im Gebirge (speziell in den Schwächezonen des Gebirges) dem mechanischen Grenzzustand auf diesen Schwächezonen im allgemeinen nahekommt.

Im Ergebnis von Messungen und Berechnungen wurde festgestellt, daß an den Rändern eines Abbaufeldes (Kammerbau mit stehenbleibenden Pfeilern) mit vertikalen Zusatzbelastungen von bis zu 40% der ursprünglichen Vertikalspannung $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot H$ gerechnet werden kann.

Der Abbau hat außerdem im Deckgebirge über den Abbaufonten Zerrungszonen zur Folge, die sich reduzierend auf die horizontalen Spannungen im Deckgebirge senkrecht zum Verlauf der Abbaufont auswirken. Diese bergbaubedingten Zusatzspannungen hängen von der Abbauführung, dem Umfang der Abbauarbeiten und der Zeit ab. Im unverritzten Salinar selbst kann man in Übereinstimmung mit der Fachliteratur sowie im Ergebnis von Messungen von einem weitgehend allseitig gleichen Spannungszustand ausgehen.

Zusammenfassend läßt sich der Gebirgsspannungszustand im Werra-Kalirevier der DDR wie folgt charakterisieren:

1. Auf Grund von Meßergebnissen, der geologischen, ins-

besondere tektonischen Situation sowie weiterer Messungen und Analysen ist nachgewiesen, daß der Grundspannungszustand des Gebirges im Werra-Kalirevier grundsätzlich mit dem großräumigen Spannungszustand in Mitteleuropa übereinstimmt. Danach ist mit einer Vertikalspannung der Größe $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot H$ und mit unterschiedlich großen Horizontalspannungen zu rechnen. Die größere der horizontalen Spannungskomponenten ist näherungsweise NW-SE gerichtet. Für die Beträge gilt $\sigma_{H1} > \sigma_v > \sigma_{H2}$. Im Werra-Kalirevier wurde in ca. 800 m Teufe bestimmt (Mittelwerte aus 3 Bestimmungen): $\sigma_{H1}/\sigma_v \approx 1,2$, $\sigma_{H2}/\sigma_v \approx 0,6$

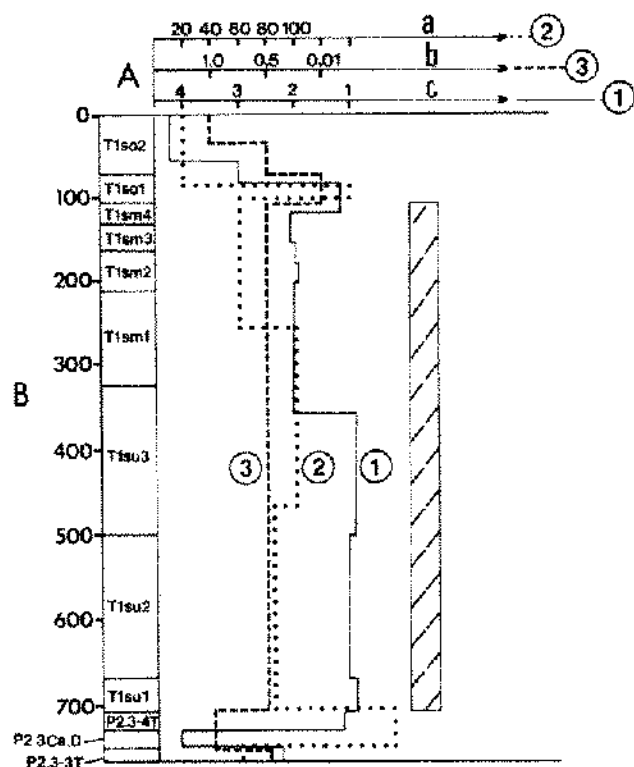
- Die regionalen geologisch-tektonischen Spannungen beanspruchen Deckgebirge, Salinar und Subsalinar gleichermaßen in horizontaler Richtung und rufen im Deckgebirge und im Subsalinar den oben charakterisierten grundsätzlichen Spannungszustand hervor. Im Salinar werden Spannungsunterschiede im allgemeinen im Zeitverlauf abgebaut, so daß mit weitgehend allseitig gleichem Spannungszustand ($\sigma_{H1} \approx \sigma_{H2} \approx \sigma_v$) gerechnet werden kann.
- Beim Abbau der Kalilagerstätten und durch die unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Salinar und Deckgebirge entstehen Zusatzspannungen im Bereich der Abbaufont. Bei stehenden Abbaufonten werden Zusatzdrücke auf das unmittelbare Anstehende verlagert; im Deckgebirge oberhalb der Abbaufonten entstehen vertikal gerichtete Scherspannungen sowie Zerrungszonen, die die horizontalen Spannungen senkrecht zum Verlauf der Abbaufont reduzieren.

GEOMECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES DECKGEBIRGES IM WERRA-KALIREVIER

Auf der Grundlage von Veröffentlichungen über den stratigrafischen Aufbau des Deckgebirges, der Ergebnisse von Bohrungen, die in jüngster Vergangenheit im Werra-Kalirevier der DDR niedergebracht wurden, und der Untersuchung der dabei gewonnenen Bohrkern können die wichtigsten geomechanischen Eigenschaften des Deckgebirges bestimmt werden. Zunächst werden anhand der Bohrung Sünna 2/75 einige Daten zusammengestellt, die auf den Ergebnissen gesteinsmechanischer Untersuchungen des Kernmaterials und auf den festgestellten Klüften im Bohrkern aufbauen.

In Figur 3 sind einige Untersuchungsergebnisse grafisch ausgewertet worden. Folgende Kenngrößen wurden längs des Schichtenschnittes aufgetragen:

Kurve 1: Unter Verwendung der Kenngröße Bohrkernstücke pro Meter Bohrkern wurde in Anlehnung an Hansagi [5] eine Einteilung in Gebirgsfestigkeitsklassen vorgenommen. Als Kriterium diente



Figur 3. Festigkeitsbewertung des Deckgebirges im Werra-Kalirevier der DDR, dargestellt am Beispiel der Bohrung Sunna 2/75. B = Bohrlöchertiefe (m), A = stratigraphischer Horizont, 1 = Gebirgsfestigkeitsklasse, 2 = mittl. Festigkeit [MN/m²], 3 = Vertikalklüfte pro m.

die mittlere Länge der Kernstücke, bezogen auf 1 m. Die Klassen bedeuten:

Klasse 4: mindestens 20 Kernstücke/m, d.h. mittlere Kernlänge $l < 5$ cm

Klasse 3: $l \approx 7$ cm

Klasse 2: $l \approx 10$ cm

Klasse 1: $l \approx 20$ cm

Die Klasse 1 umfaßt einen relativ großen Bereich, da vor allem in den Horizonten T1su 2 (Unterer Buntsandstein) und T1su 3 (Unterer Buntsandstein) nicht selten Kernstücke mit $l > 1$ m erhöht wurden.

Kurve 2: Eine Expreßbestimmung der Gesteinsfestigkeiten an unbearbeiteten frischen Bohrkernen, ergänzt und verglichen mit detaillierten Festigkeitsuntersuchungen an bestimmten Horizonten sowie mit Literaturangaben, sind die Grundlagen für die Darstellung der Kurve 2, der Kurve der mittleren Gesteinsfestigkeiten.

Kurve 3: Kurve 3 gibt die Klassifizierung nach der Kenngröße: im Bohrkern angetroffene Klüfte mit steilem Einfallen pro Bohrmeter an. Diese Klüfte sind überwiegend verheilt bzw. geschlossen.

Der Kerngewinn betrug unterhalb des Horizontes T1sm 2 mit wenigen unbedeutenden Ausnahmen $\approx 100\%$.

Ausführliche Dichtebestimmungen an trockenen, bergfeuchten und wassergesättigten Gesteinsproben aller Schichten des Deckgebirges ergaben den gesicherten mittleren Dichtewert

$$\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$$

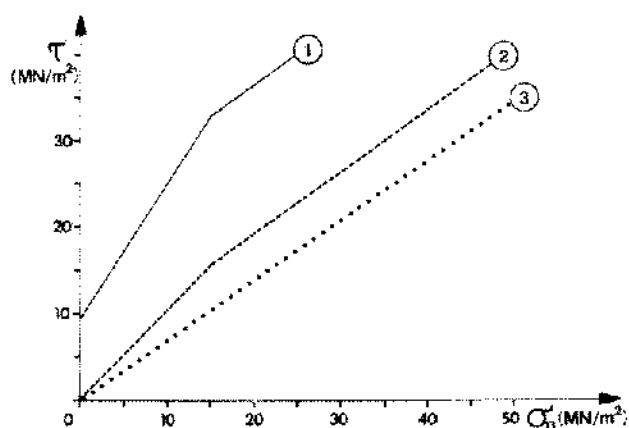
Die Auswertung zeigt, daß mindestens zwischen den Horizonten T1sm 4 (Mittlerer Buntsandstein) und T1su 1 (Unterer Buntsandstein) das Deckgebirge durchgehend fest und wenig zerlegt ist. Diese Schicht mit einer Mächtigkeit von ca. 500 m stellt somit geomechanisch eine massive und kompakte Deckgebirgsplatte dar.

Das Festigkeitsverhalten von Sandstein aus dem Deckgebirge des Werra-Kalireviers wurde anhand von einachsigen Druckversuchen, Triaxialversuchen nach dem Kármán-Prinzip und triaxialen Scherversuchen sowie petrographischen Untersuchungen bestimmt. Die Untersuchungen wurden an ca. 280 zylindrischen Probekörpern durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in zusammengefaßter Form in Figur 4 dargestellt. Kurve 1, die Kurve der monolithischen Gesteinsfestigkeit, ergibt sich aus triaxialen Festigkeitsuntersuchungen nach dem Kármán-Prinzip und aus triaxialen Scheruntersuchungen. Beide Versuchsarten führen im Rahmen der Meßgenauigkeit zu identischen Werten.

Zur Eingrenzung der geomechanischen Parameter natürlicher Schwächeflächen des Gebirges werden Untersuchungen an unterschiedlich ausgebildeten Schwächeflächen in Gesteinsproben durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse sind in den Kurven 2 und 3 der Figur 4 wiedergegeben. Kurve 3 stellt die sogenannte Restscherfestigkeit dar. Sie wurde an künstlich hergestellten glatten Schnittflächen ermittelt. Diese Kurve repräsentiert die untere Grenze der Scherfestigkeit trockener Schwächeflächen.

Scheruntersuchungen an natürlichen verzahnten Kluft-



Figur 4. Grenzkurven monolithischer und gestörter Sandsteinproben. 1 = monolithisches Gestein, 2 = raue Trennflächen, 3 = Restfestigkeit glatter Trennflächen.

flächen führen bei einmaliger Scherung zu Grenzkurve 2. Wiederholte Scherung entlang rauher Trennflächen verschiebt die Grenzkurve 2 zur Kurve 3 hin. Die möglichen Parameter natürlicher Schwächeflächen im Deckgebirge des Werra-Kalireviers werden von den Kurven 2 und 3 näherungsweise eingegrenzt.

Geologische Störungen, deren Festigkeitsverhalten in den durchtrennten Bereichen im wesentlichen durch Grenzkurve 2 bestimmt wird und deren Durchtrennungsgrad D durch Materialbrücken oder absetzigen Verlauf $D < 1$ ist, sollen geomechanisch als *potentielle* Schwächeflächen bezeichnet werden. Geologische Störungen, die völlig durchtrennt und glatt sind und deren Festigkeit im wesentlichen der Restscherfestigkeit (Kurve 3) entspricht, werden im geomechanischen Sinne als *ausgeprägte* Schwächefläche bezeichnet.

Die charakteristischen Verformungskurven des monolithischen Gesteins weisen nach, daß Gesteinsschichten im Deckgebirge (besonders ausgeprägt bei kieseligem Bindemittel) Sprödbrokeigenschaften besitzen und zur schnellen Abgabe gespeicherter Energie neigen [2]. Diese Aussage trifft auch für die Kontaktstellen und Materialbrücken der potentiellen Schwächeflächen zu, so daß unter bestimmten Bedingungen nichtstatische Belastungen den Scherwiderstand dieser potentiellen Schwächeflächen erheblich und kurzfristig herabsetzen können.

WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN ABBAUHORIZONT UND DECKGEBIRGE SOWIE GRUNDSÄTZE DER ABBAUFÜHRUNG

Das Gebirge im Werra-Kalirevier gliedert sich vertikal in das Deckgebirge, das Salinar mit den Abbauhorizonten und das Subsalinar. In den weiteren grundsätzlichen Ausführungen wird nur ein Abbauhorizont, das carnallitische Flöz "Thüringen", betrachtet. Das Gebirge ist inhomogen durch das Vorhandensein geologisch unterschiedlich ausgebildeter Störungen. Diese Störungen sind entsprechend ihrer geologischen Ausbildung mechanisch unterschiedlich wirksam.

Die geologischen Störungen lassen sich—wie bereits erwähnt—vom geomechanischen Standpunkt aus in zwei Grundtypen mechanischer Schwächeflächen einteilen.

Potentielle Schwächeflächen sind solche geologische Störungen, deren Kontaktzonen sich unterhalb einer bestimmten Grenzbeanspruchung im relativ festen mechanischen Verbund befinden und die Spannungen aufnehmen können. Bei bestimmten Beanspruchungen können diese Störungen die Fähigkeit zur Spannungsaufnahme verlieren, die gespeicherte Energie freisetzen und zeitweise oder ständig als ausgeprägte mechanische Schwächeflächen wirken.

Ausgeprägte Schwächeflächen sind intensiv und großflächig durchtrennt. Sie befinden sich mechanisch im

Bereich der Restscherfestigkeit. Ausgeprägte Schwächeflächen können im Gegensatz zu potentiellen Schwächeflächen nur geringe Spannungen aufnehmen. Bei Scherververschiebungen wird hier nur in unbedeutendem Maße Energie freigesetzt.

Die potentiellen Schwächeflächen schließen nicht selten fiederförmig an ausgeprägte Störungszonen an oder bilden deren Fortsetzung. Dadurch entstehen an den Übergängen der ausgeprägten Störungszonen in die potentiellen Störungszonen zusätzliche Spannungskonzentrationen.

Die von den Störungen abgegrenzten Deckgebirgsblöcke reagieren auf den Kaliabbau und die damit verbundenen Spannungsänderungen, solange der mechanische Verbund nicht aufgehoben wird und infolge des im Gebirge herrschenden Spannungszustandes, als eingespannte Platten, deren Deformation aus der Wechselwirkung ihrer eigenen Biegesteifigkeit und dem Relaxationsverhalten des Salinars einschließlich der Abbaupfeiler resultiert. Die geologischen Störungen im Deckgebirge sind für das Verformungs- und Festigkeitsverhalten des Deckgebirges ausschlaggebend.

Anhand einer quantitativen Bewertung des geomechanischen Zustandes entlang der charakteristischen Störungen im Deckgebirge soll deren Wirkungsweise dargestellt werden (Fig. 6). Unter Berücksichtigung der bergbaubedingten Zusatzspannungen sowie der geologischen Verhältnisse ist die ungünstigste Situation im Deckgebirge dann gegeben, wenn ein Abbaurand parallel zu einer Störungslinie verläuft bzw. steht (Fig. 5).

Die horizontalen Spannungen senkrecht zur Abbaufont (d.h. die Normalspannungen auf der Störungslinie) bestimmen sich dann für zwei beispielhaft herausgegriffene Teufen $H_1 = 500$ m und $H_2 = 700$ m, die dem unteren Teil einer Deckgebirgsplatte zuzuordnen sind, wie folgt:

Fall 1: Konventionelle Lastannahme für den Spannungszustand

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

$$\sigma_{HK} = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \rho \cdot g \cdot H; \nu \approx 0,3$$

Dieser Spannungszustand wird oft angesetzt, wenn keine konkreten Kenntnisse über den realen Spannungszustand vorliegen. Hier wird diese Lastannahme nur zu Vergleichszwecken genutzt.

$$\sigma_{H_1}^* = 0,8 \cdot \sigma_{HK} = 0,8 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\nu}{1-\nu} \cdot H$$

$$\rightarrow H_1 = 500 \text{ m: } \sigma_{H_1}^{*(1)} = 39 \text{ kp/cm}^2 \approx 4 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$H_2 = 700 \text{ m: } \sigma_{H_2}^{*(2)} = 55 \text{ kp/cm}^2 \approx 5,5 \text{ MPa}$$

Fall 2: Zugrundelegen des realen Spannungszustandes und Annahme, daß σ_{H1} senkrecht zum Streichen der Störungszone orientiert ist:

$$\sigma_{n2}^* = 0,8 \cdot \sigma_{H1} = 0,8 \cdot 1,2 \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

$$\rightarrow H_1 = 500 \text{ m: } \sigma_{n2}^{*(1)} = 110 \text{ kp/cm}^2 \approx 11 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$H_2 = 700 \text{ m: } \sigma_{n2}^{*(2)} = 155 \text{ kp/cm}^2 \approx 15,5 \text{ MPa}$$

Fall 3: Wie Fall 2, aber σ_{H2} soll senkrecht zum Streichen der Störungszone orientiert sein:

$$\sigma_{n3}^* = 0,8 \cdot \sigma_{H2} = 0,8 \cdot 0,6 \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

$$\rightarrow H_1 = 500 \text{ m: } \sigma_{n3}^{*(1)} = 55 \text{ kp/cm}^2 \approx 5,5 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$H_2 = 700 \text{ m: } \sigma_{n3}^{*(2)} = 77 \text{ kp/cm}^2 \approx 7,7 \text{ MPa}$$

Für die Scherspannung im Deckgebirge kann

$$\tau \approx 0,4 \cdot \sigma_v$$

angesetzt werden.

Das bedeutet für die ausgewählten Tiefen H_1 und H_2 :

$$\tau_1 \approx 4,6 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 \approx 6,4 \text{ MPa}$$

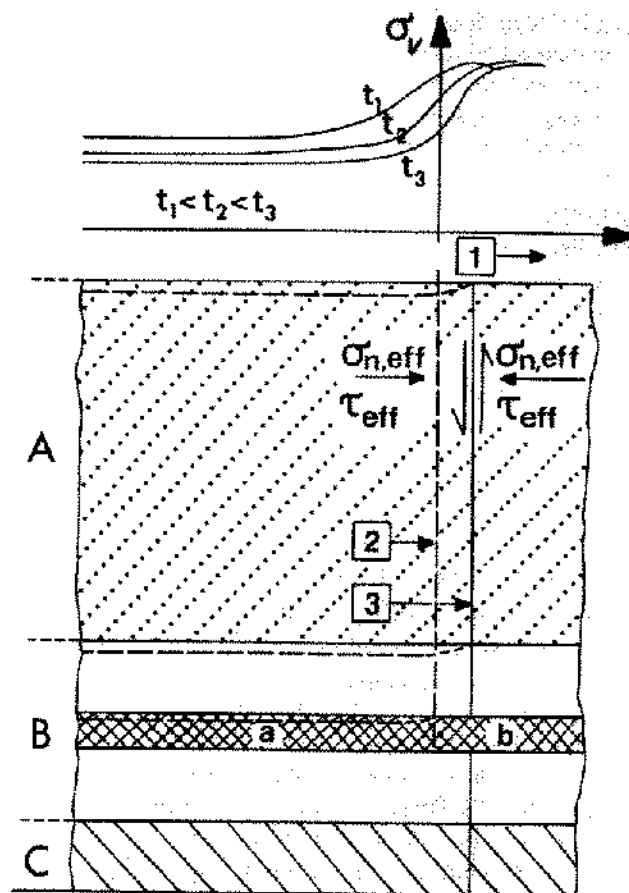
In Figur 6 sind mit diesen Spannungen und mit den Grenzkurven für Störungen im Deckgebirge nach Figur 4 Bewertungen des mechanischen Zustandes vorgenommen worden. Kurve 2 repräsentiert dabei die Grenzkurve potentieller, Kurve 3 diejenige ausgeprägter Schwächeflächen im Deckgebirge.

Die Analyse zeigt, daß im Fall 2, der den gegebenen Spannungsverhältnissen im Deckgebirge weitgehend entspricht, die geomechanischen Verhältnisse stabil sind und daß auch die abbaubedingten Zusatzspannungen von den geologischen Störungen aufgenommen werden, ohne den Grenzzustand zu erreichen.

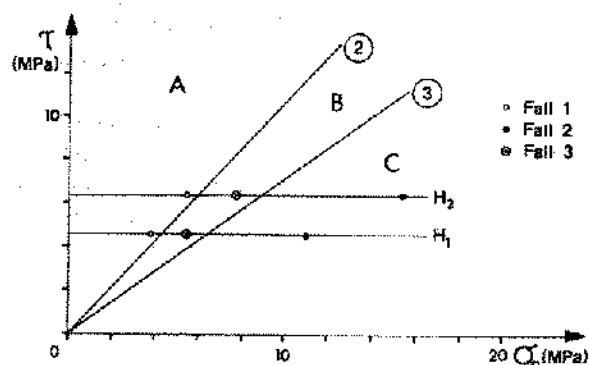
Selbst im wesentlich unwahrscheinlicheren Fall 3 bleiben die potentiellen Schwächeflächen bei quasistatischer Beanspruchung durch den Abbau stabil, während die ausgeprägten Schwächeflächen entsprechend ihrem Charakter die Spannungen durch aсейsmische Verschiebungen abbauen.

Wenn man normale, teufenbedingte und statische Kluftwasserdrücke, die aus den im Deckgebirge vorhandenen Flüssigkeiten resultieren, nach dem Gesetz der effektiven Spannungen in die Analyse einbezieht, gelangen die Spannungszustände stärker in den Grenzbereich (Fall 2, potentielle Schwächeflächen) bzw. in den Grenzzustand (Fall 2, ausgeprägte Schwächeflächen).

Diese Verhaltensweise des geologisch-tektonisch gestörten Deckgebirges, die den gegebenen geomechanischen,



Figur 5. Schematische Darstellung des Deckgebirgsverhaltens. A = Deckgebirge, B = Salinar (links (a): Kalilager abgebaut; rechts (b): nicht abgebaut), C = Subsalinar. 1 = Entfernung vom Abbaurand, 2 = Abbaufont oder -rand, 3 = Schwächefläche.



Figur 6. Geomechanische Bewertung der Spannungszustände im Deckgebirge. A = Verletzung der Grenzbedingungen, B = Gefahrbereich, C = Stabilbereich. Erläuterungen im Text.

geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen entspricht, hat im Zusammenhang mit der Entwicklung des Abbaues zur Folge:

1. Im Gebirge, insbesondere im Bereich einer Abbaufont, entstehen unterschiedliche Gebirgssteifigkeiten.

2. Als Folge des Relaxationsverhaltens der Abbaupfeiler und des unmittelbaren Hangenden und Liegenden einerseits und des Verformungsverhaltens der kompakten Deckgebirgsplatten andererseits stellen sich im Abbauhorizont unterschiedliche vertikale Belastungen ein (s.a. [10]).
3. Im Deckgebirge entstehen im Bereich der Abbauränder Scherspannungen, die vom ungestörten Gebirge und unter Normalbedingungen auch von den potentiellen Schwächeflächen, wie langjährige bergmännische Erfahrungen beweisen, bruchfrei aufgenommen werden und die auf ausgeprägten Schwächeflächen Verschiebungen mit vorwiegend aseismischem Charakter auslösen können.
4. Die Scherspannungen führen zusammen mit den eingepägten Gebirgsspannungen in den betreffenden Gebirgsbereichen zu Verformungen und damit zur Aufnahme von Verformungsenergie.

Das beschriebene Verhalten des Gebirges wird belegt durch Beobachtungen des Verformungsverhaltens der Abbaufelder und des Deckgebirges.

Die Wechselwirkung zwischen dem geologisch-tektonisch gestörten Deckgebirge und dem Abbauhorizont kann durch geeignete Führung der Abbauarbeiten so beherrscht werden, daß die Bergbausicherheit stets gewährleistet ist. Die Abbauführung muß folgende Grundsätze berücksichtigen: 1) Begrenzung der abbaubedingten Zusatzspannungen im Deckgebirge, insbesondere im Bereich potentieller Schwächeflächen, 2) Beachtung der Beeinflussung der abbaubedingten Zusatzspannungen im Vorfeld durch ausgeprägte Schwächeflächen.

In einem Abbaufeld bestimmter Ausdehnung nimmt die Pfeilerbelastung infolge der Wechselwirkung zwischen Deckgebirge und Salinar mit zunehmender Standzeit der Pfeiler ab.

Ein Pfeiler wird deshalb an der Abbaufront am stärksten beansprucht. Die Beanspruchung verringert sich mit wachsender Standzeit und mit zunehmender Entfernung der Abbaufront vom Pfeiler. In Abhängigkeit von den konkreten Bedingungen stellt sich dann ein stationärer Gleichgewichtszustand ein. Diese Phasen der Beanspruchung des Pfeilers werden unter Einschluß einer Übergangsphase durch die untertage gemessenen Deformationen bestätigt [11].

Die im Werra-Kalirevier der DDR festgestellte spezifische Form der Wechselwirkung zwischen Lagerstätte und Deckgebirge erfordert bei der Durchführung eines Kammerbaues, daß die Pfeiler an der Abbaufront entsprechend der dort wirkenden Beanspruchung erhöhte Tragfähigkeiten aufweisen. Damit wird die Ansammlung von Verformungsenergie im Deckgebirge im Bereich der Abbaufront begrenzt und die Auslösung der dort gespeicherten Energien an potentiellen Schwächeflächen durch bergbauliche

Tätigkeit verhindert. Dieser Forderung wird im Kalibergbau der DDR im Werra-Revier durch einen zweiphasigen Abbau, der an der Abbaufront planmäßig mit Pfeilern erhöhter Tragfähigkeit arbeitet, Rechnung getragen [6, 11]. Die Wechselwirkung zwischen Abbauhorizont und Deckgebirge wird unter Berücksichtigung der gegebenen geologisch-tektonischen Struktur des Gebirges auf diese Weise sicher beherrscht. Der zweiphasige Abbau bietet außerdem die Möglichkeit, auf veränderte Spannungen im Vorfeld infolge des Vorhandenseins ausgeprägter Schwächeflächen im Gebirge sowie auf verschiedene geologisch bedingte lokale Besonderheiten (CO_2 -Führung, Änderungen der Lagerausbildung usw.) in der sekundären Abbauphase so zu reagieren, daß diese Besonderheiten die Bergbausicherheit nicht beeinträchtigen. Eine solche Möglichkeit ist bei einer geologisch kompliziert ausgebildeten Lagerstätte von sehr großem Wert.

Die beschriebenen Grundsätze und Maßnahmen sichern eine geomechanisch begründete und auf das reale Gebirgsverhalten abgestimmte Abbauführung. Die Analyse zeigt aber auch, daß abbaufremde äußere Einflußfaktoren die auf die vollständige Gewährleistung der Bergbausicherheit abgestimmte Abbauführung empfindlich stören können. Insbesondere können Faktoren, die den geomechanischen Charakter der potentiellen Schwächeflächen und die Spannungsverteilungen im Deckgebirge in nicht beeinflussbarer Weise verändern (z.B. durch unnatürliche hydrodynamische Veränderungen im Deckgebirge), vollkommen neue Beanspruchungen im Abbauhorizont hervorrufen.

Verliert z.B. eine potentielle Schwächefläche kurzfristig ihre Energiespeicherfähigkeit im Bereich eines Abbaufeldes, so können dynamische Beanspruchungen der Abbaupfeiler verursacht werden, gegen die bei Carnallitpfeilern keine sichere Bemessung möglich ist. Alle abbaufremden Einflußfaktoren, die die dargestellte Wechselwirkung stören, müssen deshalb zur Gewährleistung der Bergbausicherheit zuverlässig vom Deckgebirge über im Abbau befindlichen Kalilagerstätten ferngehalten werden.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Untersuchungen des geomechanischen Verhaltens des Deckgebirges und seiner Wechselwirkungen mit der Entwicklung der bergbaulichen Arbeiten im Abbauhorizont unterstreichen die Notwendigkeit, Standsicherheitsanalysen im Bergbau nicht auf die Pfeiler und deren quasistatische Belastung durch eine zugeordnete Deckgebirgssäule allein zu beschränken. Die Wechselwirkung zwischen beiden Komponenten ist wesentlich komplizierter und muß bei der Abbauführung konkret berücksichtigt werden. Bestimmte Verhaltensweisen des Systems Deckgebirge—Abbauhorizont, wie z.B. 1) die von verschiedenen Autoren wiederholt beobachtete Hebungs-Senkungs-Verteilung an der Tagesoberfläche über Kali-Abbaugebieten im Werra-Gebiet,

2) die hohe Pfeilerbeanspruchung an der Abbaufont, und 3) die Überbrückung zu Bruch gegangener Pfeiler in den Bruchfeldern der Ereignisse Merkers 1958 und Heringen 1953 über große Spannweiten, lassen sich durch das beschriebene Deckgebirgsverhalten widerspruchsfrei erklären.

Im Werra-Kalibergbau der DDR wird der Wechselwirkung Deckgebirge—Abbauhorizont durch den Maßnahmenkomplex 1) wissenschaftlich begründetes und umfassend erprobtes Dimensionierungsverfahren, 2) praxisbezogene Anwendungsvorschriften für dieses Dimensionierungsverfahren und 3) Grundsätze für räumliche und zeitliche Entwicklung des Abbaus unter Beachtung der geologischen Verhältnisse im Gebirge Rechnung getragen.

Der zuletzt genannte Maßnahmenkomplex kann durch umfangreiche und zielgerichtete geomechanische und geologische Forschung sowie systematische untertägige Messungen auf das reale Verhalten des geologisch-tektonisch gestörten Deckgebirges abgestimmt werden, um die Bergbausicherheit auch bei komplizierten Lagerstättenverhältnissen jederzeit zu gewährleisten. Einflußfaktoren, die die natürlichen Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkung zwischen Deckgebirge und Abbauhorizont stören, müssen jedoch zu ständigen Gewährleistung der Bergbausicherheit beseitigt werden.

LITERATUR

1. Ahorner, L. 1975. Present-Day Stress Field and Seismotectonic Block Movements along Major Fault Zones in Central Europe. *Tectonophysics*, 29, 233–249.
2. Bieniawski, Z.T. 1968. Fracture Dynamics of Rock. *Int. J. Fracture Mech.*, 4.
3. Greiner, G. 1975. In-situ-Stress Measurements in Southwest Germany. *Tectonophysics*, 29, 233–249.
4. Haimson, B.C. 1973. Earthquake Related Stress at Rangely, Colorado. In Hardy, H.G.: *New Horizons in Rock Mechanics* Ed.: ASCE, 689–708.
5. Hansagi, J. 1974. A Method of Determining the Degree of Fissuration of Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 11:379–388.
6. Höfer, K.H., Kiesewetter, G. and Siebler, P. 1978. Gebirgsmechanische und bergrechtliche Probleme der Bergbausicherheit im Kalibergbau aus der Sicht des Kali-Werra-Reviere der DDR. V. Int. Salz-Symposium, Hamburg, 1978.
7. Hoppe, W. 1966. Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik. I: Das Werra-Gebiet. *Freiberger Forschungshefte*, C, 97/1.
8. Knoll, P., Bankwitz, B., Thurm, H., Schneider, M.M. und Thoma, K. 1978. Spannungsverteilung im Südosten der Deutschen Demokratischen Republik, abgeleitet aus direkten Untertagemessungen und rezenten Krustenbewegungen. *Neue Bergbautechnik*, 7, 366–370.
9. Knoll, P., Vogler, G. und Schmidt, M. 1977. Bisherige Ergebnisse von Spannungsmessungen mit Hilfe der Bohrlochentlastungsmethode. *Freiberger Forschungshefte A* 569, 29–45.
10. Mackintosh, A.D. 1977. Strata Control in a Deep Saskatchewan Potash Mine. 6. Int. Strata Control Conf., Banff/Canada.
11. Menzel, W., Sievers, J. und Schreiner, W. 1978. Geomechanische Forschung—Grundlage für die Gestaltung des Abbaus im Kaliflöz Thüringen. V. Int. Salz-Symposium, Hamburg, 1978.
12. Heßmann, W., Richter, E. 1978. Zu den strukturgeologisch-tektonischen Verhältnissen im Werra-Kalirevier der DDR. *Z. f. Angew. Geologie*, 24, 7/8, 292–296.