

**GEBIRGSVERHALTEN INFOLGE VON
HOHLRAUMBILDUNGEN**

von

Georg Feder

**Bundesministerium für Handel, Gewerbe und Industrie;
Grundlagen der Rohstoffversorgung, Heft 5, Geotechnik und Sicherheit im Erzbergbau – Seminar in Eisenerz
am 5. und 6. Dezember 1978, Wien 1979.**

Gebirgsverhalten infolge von Hohlräumbildungen

Von Georg Feder*)

Das Verhalten, welches das Gebirge dem Bergmann und Mineur entgegenbringt, beruht vielfach auf Gegenseitigkeit. Ein entsprechendes Einfühlungsvermögen in die jeweiligen Gebirgscharakteristiken ist daher die Voraussetzung, um ein gutmütiges Gebirgsverhalten zu erzielen. Der Bergmann, der in ein und demselben Gebirge erfahren geworden ist, behandelt dieses allein schon intuitiv richtig.

Die folgenden Ausführungen sind daher vor allem für jene Bergleute gedacht, die von der Wirtschaftslage gezwungen wurden, entweder sich „ein neues Gebirge zu suchen“ oder, zwar in „ihrem Gebirge“ zu bleiben, aber mit anderen neuen Abbautechnologien nun das Gebirge zu anderen neuen Verhaltensweisen herauszufordern.

1. Versagensformen des Gebirges in der Hohlraumumgebung

Da man auch beim Gebirge den Charakter vor allem aus dem Verhalten unter Überbeanspruchung erkennt, sollen zunächst im folgenden die wesentlichsten Versagensformen, mit denen das Gebirge auf Hohlraumbauten reagieren kann, besprochen werden:

1.1. Spaltbruch

Abb. 1 zeigt die Anfangsphase des Bruchversagens festen Gebirges unter Druckbeanspruchung. Diese als „Spaltbruch“ oder „Abschalen“ bezeichnete Bruchform tritt meist an den Stößen auf. Dies deshalb, weil im allgemeinen der vertikale Primärdruck wesentlich größer ist als der horizontale. Ist dies nicht der Fall, so kann wie in Abb. 2 gezeigt, der Spaltbruch auch am ganzen Umfang auftreten.

Der Spaltbruch zeigt folgende Eigenheiten:

- Keine Energievernichtung durch Reibung, daher bei sprödem Gebirge auch als Bergschlag auftretend. Ansonsten großvolumige Auflockerung und somit meist Ursache großer Horizontal-konvergenz.
- Starke Abhängigkeit von der möglichen geraden Länge der abgespaltenen Schalen. Ebene Stöße brechen daher viel leichter als gewölbte (Analogie zur Knickung).
- Starke Abhängigkeit von der Querstützung. Je weniger spröde ein Gebirge ist, desto leichter läßt sich der Spaltbruch durch eine Querpressung (Ausbaudruck) verhindern. Er tritt dann erst bei höherer Belastung auf oder überhaupt nicht mehr. Im letzteren Fall erfolgt dann das Versagen in Form eines Scherbruches.

Will man den Spaltbruch durch einen Ausbauwiderstand verhindern, so muß man dies tun bevor der Spaltbruch eingetreten ist. Dies klingt banal, wird aber meist nicht beachtet. Es muß dann nämlich vom Ausbau folgendes verlangt werden:

- Er muß bereits im Bereich der stützenden Ortsbrust wirken.

*) Anschrift des Verfassers: o.Univ. Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Feder, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben.

- Er darf unter der erforderlichen Stützkraft nicht nachgiebiger sein, als das Gebirge bruchlos zu ertragen vermag. Ausbaue die durch ihren Biege­widerstand wirken (Abb. 3a) sind hier ungeeignet. Erforderlich ist der harte Gewölbewiderstand.
- Der Ausbau muß auf ganzer Länge kompakt am Gebirge anliegen. Ein Spielraum, wie er sich meist am First ergibt, macht den Ausbau für ein Verhindern des Spaltbruches ungeeignet (Abb. 3b), da er durch Ovalverformungen ausweicht und erst dann zu tragen beginnt, wenn das Gebirge bereits abschalt. Abb. 3 c und d zeigen brauchbare Ausführungen. Für das Hinterpakken der Streckenbögen wird dabei meist Spritzbeton verwendet.

1.2. Scherbruch

Abb. 4 zeigt typische Scherbrüche, wie sie sich zwischen besonders gleit­freudigen Gefügeflächen (Gleitlösen) einstellen. Zum Unterschied vom Spaltbruch verläuft der Scherbruch nicht in Richtung der größten Druckspannung, sondern etwa $45^\circ - \varphi/2$ (also etwa 30°) gegen diese geneigt. Das Gleiten der sägezahnförmig entstandenen Bruchflächen und das gleichzeitige Zerquetschen der „Zahns­pitzen“ gibt dem Gebirge die Möglichkeit einer vertikalen Stauchung des Stoßbereiches bei gleichzeitiger Querdehnung (mit φ wurde der Winkel der inneren Reibung des Gebirges bezeichnet). Zeigen die Gleitlösen einen Reibungsfaktor der Bewegung der wesentlich kleiner als der der Ruhe ist, dann kann auch die in Abb. 4 dargestellte Bruchform in bergschlagartiger Geschwindigkeit auftreten.

Ist das Gebirge homogen, dann treten die Scherbrüche leicht gekrümmt und meist gegenläufig gerichtet auf, sodaß schließlich vom Ulm her ein „Kirsch­kern“ in den Hohlraum gequetscht wird. Dabei genügt zuweilen auch bereits eine einzige Scherbruchfläche (Abb. 5 und 7b). Selbstverständlich ist die erste und oft einzige Scherbruchfläche jene, die am besten bereits vorhandene natürliche Trennflächen des Gebirges für sich ausnützen kann.

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt, tritt der Scherbruch bei festem Gebirge oft erst bei ausreichend großer Quer­pressung, das heißt bei ausreichend großem Ausbau­widerstand auf, sonst stellt sich der Spaltbruch ein. Im Gegensatz zum Spaltbruch bleibt aber beim Scherbruch die Auflockerung nur auf die wenigen Bruchflächen beschränkt, dazwischen bleibt das Gebirge kompakt, weshalb hier die Gesamtauflockerung wesentlich kleiner ist.

1.3. Gefügebruch

Abb. 6 zeigt das Ergebnis von Triaxversuchen an Bohrkernen. Der Spaltbruch (A) ergab sich bei geringer, der Scherbruch (B) bei größerer Quer­pressung. Bei noch größerer Quer­pressung oder hydrostatischem Druck ergibt sich bei porösem Gebirge (Tuff, manche Sandsteine, Ziegel, Löss) der Gefügebruch (C). Dabei wandelt sich das Gebirge in einen dicht gelagerten, aber doch losen Feinsand um.

1.4. Gemischter Quetschbruch (Abb. 7a)

Schreitet ein Bruchvorgang nach Bild 1 tiefer bergwärts fort, so bildet sich an jedem Stoß zunächst eine Spaltbruchzone, (A) die aber mit der Entfernung vom Ausbruchrand immer mehr an Höhe verliert, weil zum Ausquetschen des zerdrückten Materials oben und unten eine Schrägfläche (F) mit der dem Reibungswinkel entsprechenden Steigung erforderlich ist. Dadurch wird nun aber zwangsläufig die für den Spaltbruch erforderliche Abspaltlänge kleiner und damit die Tragkraft größer. Ein Umschlagen zum Scherbruch (B) ist schließlich die Folge, wobei das bergseitige Ende der Bruchzone ausgerundet wird. Weitere Scherbrüche müßten nun über größere Bereiche der „Kiefer“ des die Bruchzone zerquetschenden „Ulm­enmaules“ verlaufen. Der damit angewachsene Scherbruchwiderstand hat zuweilen zur Folge, daß im bergseitigen Grunde der Bruchzone schließlich ein Gefügebruch (C) auftritt (Abb. 7a).

1.6. Bruchloses Plastizieren

Im milden Gebirge und in bindigen Lockerböden tritt diese Versagensform auf. Meist werden dabei die Stöße hohlraumwärts ausgequetscht (Abb. 8 und 9). Der Vorgang läuft meist über längere

Zeiträume ab. Er wird wesentlich vom Porenwasserüberdruck, also vom Grad der Wassersättigung und vom Filterwiderstand des Gebirges beeinflusst.

1.7. Hereinwandern eines Schichtenpaketes

Im geschichteten Gebirge ermöglicht der Hohlraum ein Entspannen der angeschnittenen Schichten. Diese wandern dabei dem Hohlraum zu. Da die dieser Bewegung entgegenwirkende Reibung mit der Tiefe der bewegten Zone wächst, kommt der Vorgang nach einem berechenbaren Entspannungsweg von selbst zum Stillstand.

Die Wanderkraft (der sich die Reibung entgegenstemmt) hängt außer vom Primärdruck noch von der Dicke des bewegten Schichtpaketes ab. Dieses bildet sich daher leider meist breiter als das Ausbruchprofil aus, wodurch Scherbruch- und Faltungserscheinungen (Abb. 10) ausgelöst werden.

1.8. Zugbruch

Ist der horizontale Primärdruck deutlich kleiner als der vertikale und/oder der Hohlraum deutlich breiter als hoch, dann bilden sich in First und Sohle Zugzonen aus. Diese führen im festen Gebirge zur Lockerung des Gefüges und damit zur Gefahr des First-Niederbruches (Abb. 11). Diese Gefahr wird durch jede Art von Klüften und Lockerzonen noch erhöht.

1.9. Kaminartiger Niederbruch

Im Gebirge mit geringer Kohäsion kommt es ab einer bestimmten Größe der ungestützten Firstfläche zu einem Niederbruch, der sich hunderte Meter nach oben fortsetzen kann, sofern dem ausströmenden Material ausreichender Raum zur Verhinderung eines Rückstaus zur Verfügung steht (Abb. 12).

Erreicht der Niederbruch die Tagesoberfläche, so bildet sich dort eine Pinge, ein Krater, der sich solange vergrößert als Material abströmen kann.

Diese Bruchform kann im kohäsionsarmen Gebirge auch in Form eines Ortsbrustverbruches auftreten, kommt dann aber zum Stehen, sobald die Neigung der verbrochenen Ortsbrust dem Winkel der inneren Reibung nahekommt (Abb. 13).

Da bei dem hier vorausgesetzten Gebirge mit geringer Kohäsion diese oft von der Bergfeuchtigkeit beeinflusst wird, spielen hier Einwirkungen, wie z.B. die Schneeschmelze, für das Anlaufen eines solchen Bruchvorganges eine ganz wesentliche Rolle.

1.10. Domausbruch

Hat die Größe der ungestützten Firstfläche noch nicht das für den kaminartigen Niederbruch erforderliche Ausmaß erreicht, so kann sich dennoch bei geringer Gebirgszugfestigkeit ein Niederbruch einstellen, der aber dann als Domausbruch zum Stehen kommt (Abb. 14). Auffallend ist dabei der ebene Domhimmel. Er ergibt sich dadurch, daß die ausgebrochene Domhöhe gerade jener Länge entspricht, deren Gewicht die Zugfestigkeit des Gebirges gerade nicht mehr aufnehmen könnte.

2. Prognose der Versagensform und Sicherheitsanalyse

Jede Versagensform läßt sich rechnerisch erfassen. Die erforderlichen Gleichungen können den im Literaturnachweis angeführten Arbeiten entnommen werden. Die Hauptschwierigkeit liegt jedoch in der Ermittlung der Kennwerte des Gebirges hinsichtlich der Festigkeit und des Verformungsverhaltens sowie hinsichtlich des Primärdruckes und der abbaubedingten Druckumlagerungen. Da auch umfangreiche Datenermittlungen nur für die Entnahmestelle der Probe gelten und im Zuge des Vortriebes jedoch die Verhältnisse sich oft abrupt ändern, muß für die Sicherheitsanalyse ein sehr wirklichkeitsnaher Weg wie folgt beschritten werden:

2.1. Voruntersuchung

Aus Bohrkernen werden Richtwerte der Gebirgseigenschaften gemessen. Mit diesen wird rechnerisch ermittelt, welche der angeführten Versagensformen unter diesen Umständen möglich sind und welche Stützmittel und Bauweisen erforderlich sind, diese zu verhindern. Ferner wird schon im voraus ermittelt, welche Stützmaßnahmen bei schlechterem und besserem Gebirge getroffen werden müssen. Meist werden dabei etwa 4 verschiedene Gebirgsgüteklassen in Betracht gezogen. Zu jedem Entwurf wird auch die voraussichtliche Konvergenz und Firstsetzung gerechnet.

2.2. Ausführung

Der wichtigste Behelf zur Bemessung der Stützmaßnahmen ist die Messung von Konvergenz und Firstsetzung. Sie ist allerdings nur brauchbar, wenn sie bereits im Ortsbrustbereich begonnen wird, wobei man sich dessen bewußt sein muß, daß etwa ein Drittel der endgültigen Verformungen bereits in Bereichen stattfindet, die noch vor der Ortsbrust liegen, also noch gar nicht zugänglich sind. Aus den im Zuge des Wegwanderns der Ortsbrust gemessenen Deformationen kann man aber entnehmen

- ob der angenommene Bruchvorgang wirklich eingetreten ist
- ob die Gebirgseigenschaften von einer Meßstelle zur nächsten gleichgeblieben sind
- ob der Verformungsvorgang zum Stillstand kommt oder noch schleichend weiterläuft
- ob durch abbaubedingte Umlagerungsdrücke bereits abgeklungene Verformungsvorgänge wieder anlaufen.

Beispiel:

Zeigen sich beispielsweise beim Vortrieb einer Förderstrecke Konvergenzen in der Größenordnung von Millimetern, so läßt dies erwarten, daß sich an den Stößen kein Bruchvorgang eingestellt hat. Springen die Meßdaten auf die Größenordnung mehrerer cm bis dm über, zeigt dies im festen Gebirge das Anlaufen von Spaltbruchmechanismen an. Auch die Mächtigkeit der Bruchzonen der Stöße kann aus der Konvergenz abgeschätzt werden. Damit kann wiederum auf das Zunehmen der Mächtigkeit einer Zugzone im Firstbereich geschlossen werden u.s.f.

Die Entscheidung über eine Änderung der Stützmaßnahmen hinkt zwar immer um einige Meßstellendistanzen nach, doch ist dies durch nachträgliche zusätzliche Stützmaßnahmen durchaus beherrschbar, wenn man in schlechtem Gebirge die Meßstellen entsprechend enger setzt. In manchen Fällen genügt bereits die Anfangstangente des Zeit-Konvergenz-Diagramms zur Entscheidung über eine Änderung der Stützmaßnahmen.

3. Schlußfolgerung und Zusammenfassung

Das Gebirgsverhalten um Hohlraumbauten ist sehr vielgestaltig, läßt sich aber typisieren und rechnerisch erfassen.

Wegen der im Verlaufe des Vortriebes wechselnden Gebirgseigenschaften und der auch im Laufe der Zeit wechselnden Gebirgsdrücke und Bergwasserverhältnisse sind Prognosen über Sicherheit und Bruchmechanismus nur unter laufender Beziehung von Konvergenz- und Firstsetzungsmessungen möglich. Dabei wird von vorhergegangenen Untersuchungen typischer Gebirgsproben hinsichtlich deren Festigkeits-, Durchlässigkeits- und Verformungseigenschaften und von deren rechnerisch erfaßbaren Zusammenhängen mit den gemessenen Formänderungen ausgegangen. Hierzu wird auf die nachstehenden Veröffentlichungen verwiesen.

Literaturhinweise:

- G. F e d e r: Zum Stabilitätsnachweis für Hohlräume in festem Gebirge bei richtungsbetontem Primärdruck. BHM 1977, Heft 4, S. 131 – 140.
- G. F e d e r : Einfluß von Bauverfahren, Anisotropie und Ausbruchsform auf die Konvergenz und den Stützmittelbedarf tiefliegender Hohlraumbauten. Straßenforschungsheft 124 des BMBT, Verlag: Forschges. f. Straßenwesen ÖIAV, A-1010 Wien, Eschenbachg. 9 (ISSN 0379-1491).

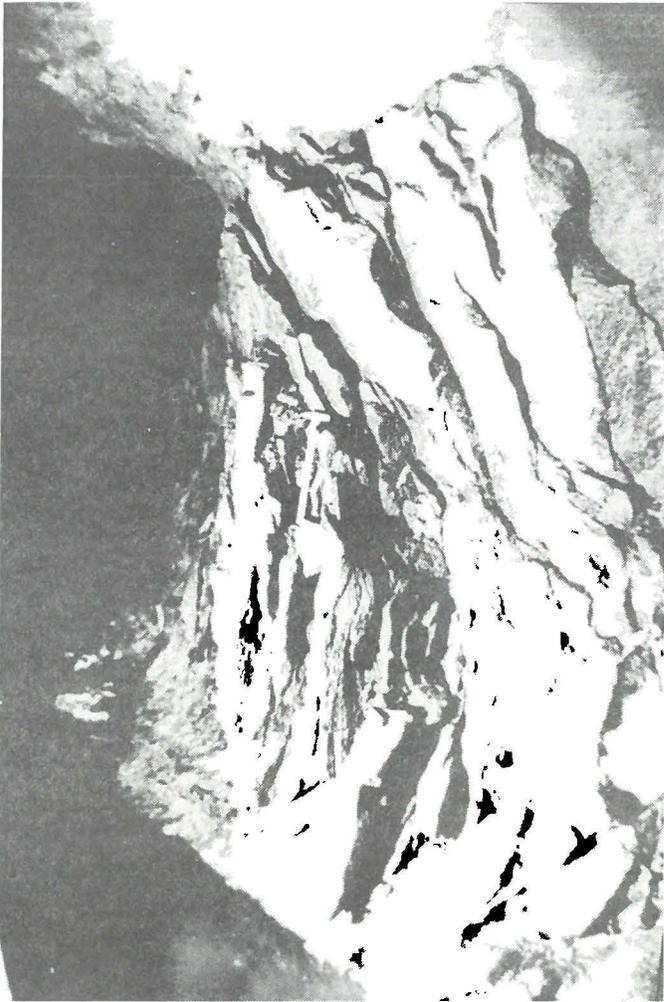


Abb. 1: Spaltbrüche (Abschalungen). (Von Herrn o. Prof. Dr. G. Hominger, TU Wien, freundlicherweise zur Verfügung gestelltes Bild).



Abb. 2: Spaltbrüche am gesamten Ausbruchrand.

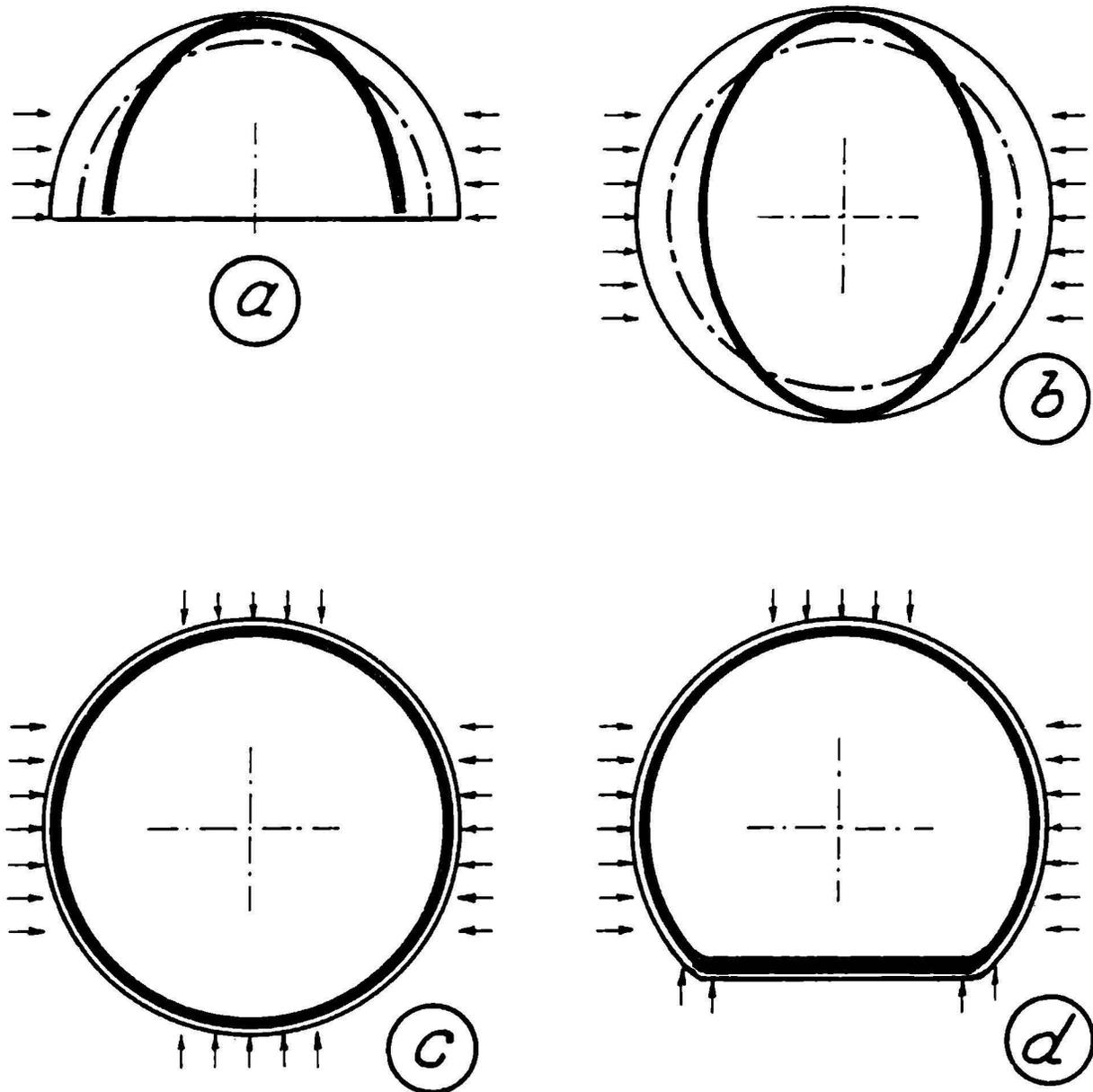


Abb. 3: a . . . Weicher Ausbau wegen fehlenden Ringschlusses.
 b . . . Weicher Ausbau wegen fehlenden kompakten Gebirgskontaktes.
 c und d . . . Für das Verhindern eines Spaltbruchmechanismus ausreichend steifer Ausbau infolge der Fähigkeit statt des Biegeverbandes einen Gewölbewiderstand zu aktivieren.

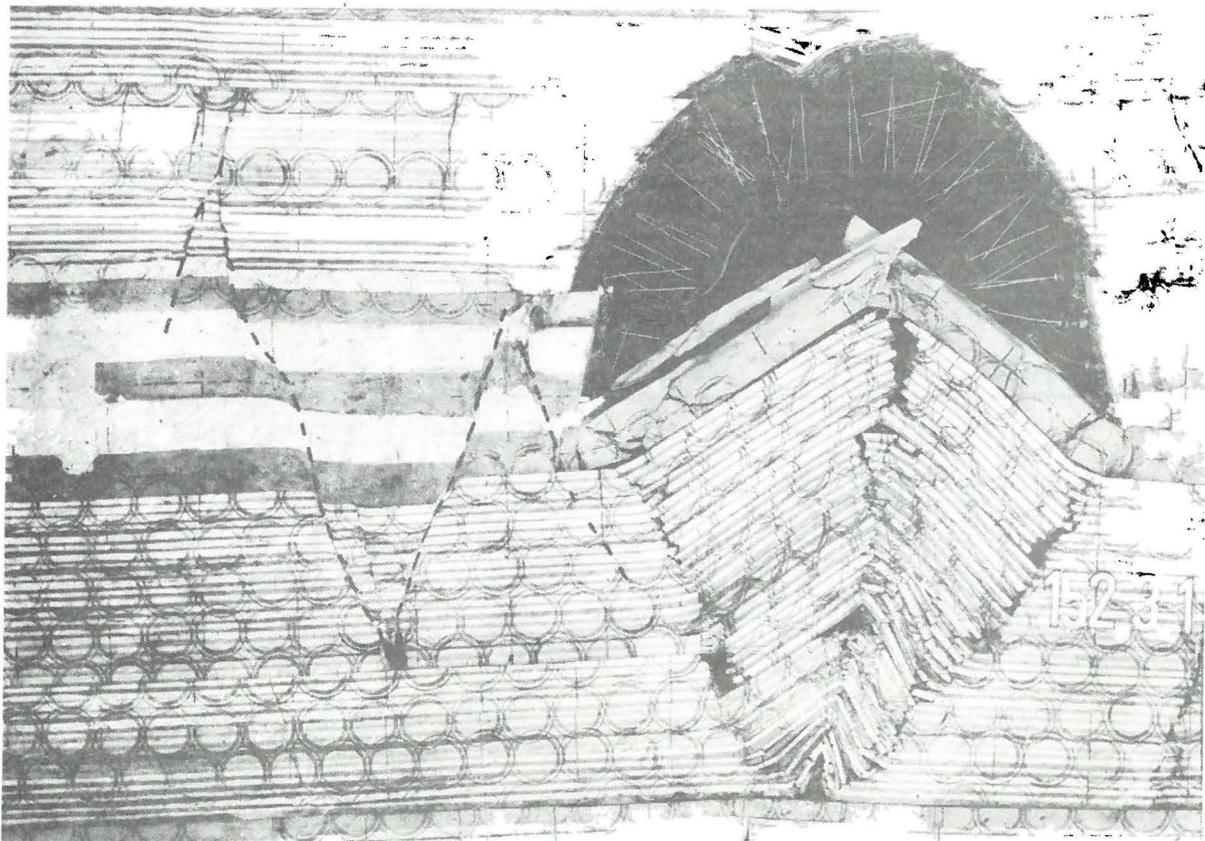


Abb. 4: Scherbrüche zwischen söhligem Gleitlösen. (Von Herrn Dr. O. Jacobi, Bergbauforschung Essen freundlicherweise zur Verfügung gestelltes Bild).

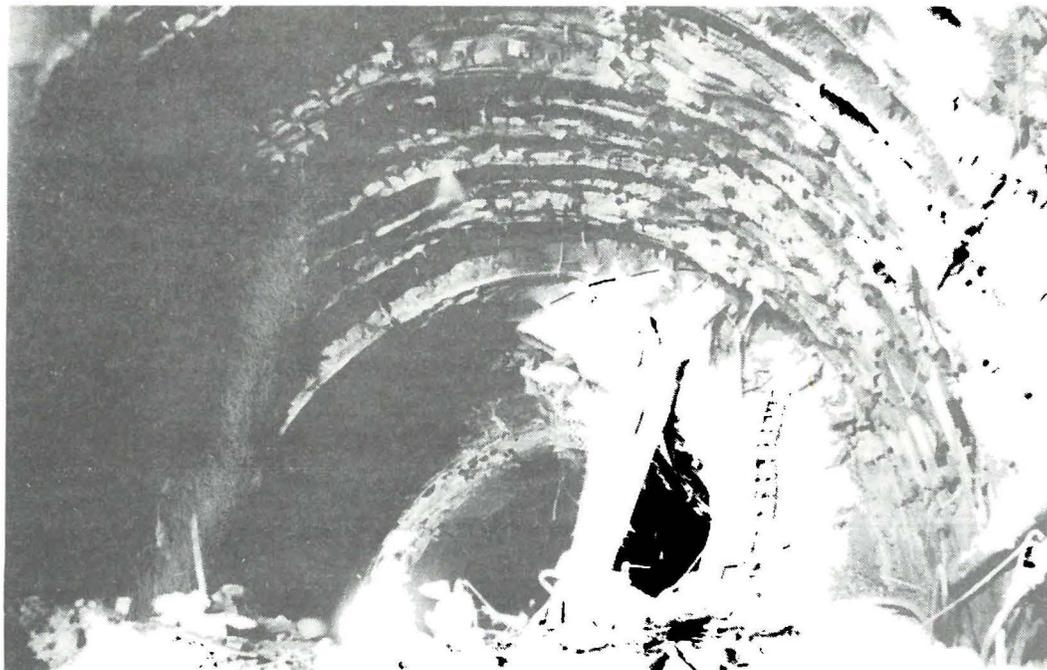


Abb. 5: Scherbruch zum Ausquetschen des überlasteten Stoßbereiches.

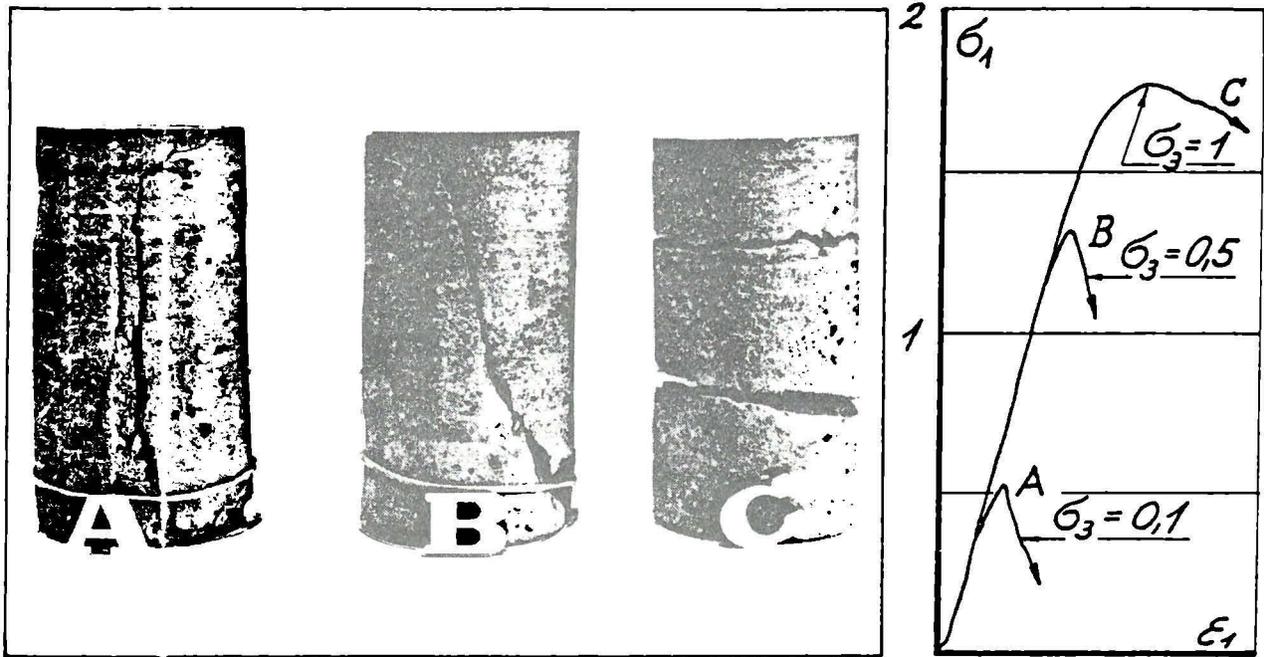


Abb. 6: Bruchformen am Triaxversuch an Bohrkernen
 A ... Spaltbruch
 B ... Scherbruch
 C ... Gefügebruch

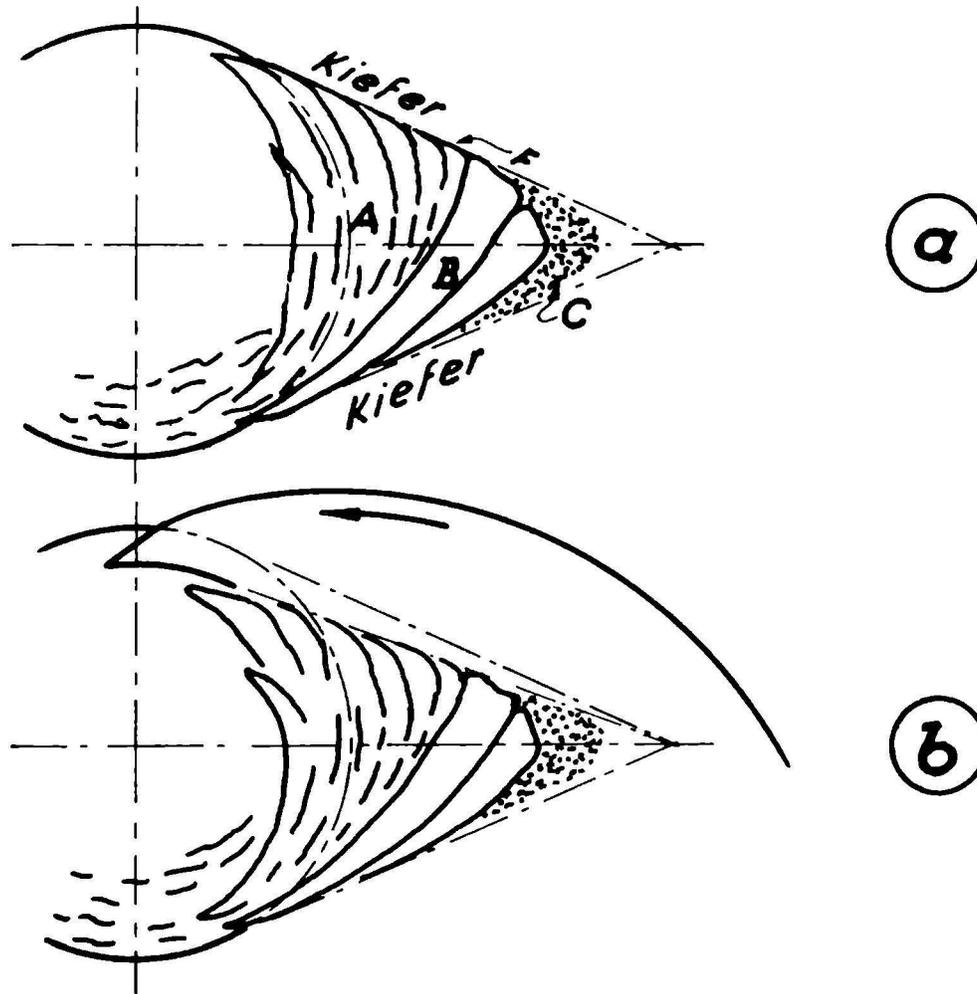


Abb. 7: a ... gemischter Quetschbruch
 b ... endgültiger Kollaps durch Scherbruch eines „Kiefers“

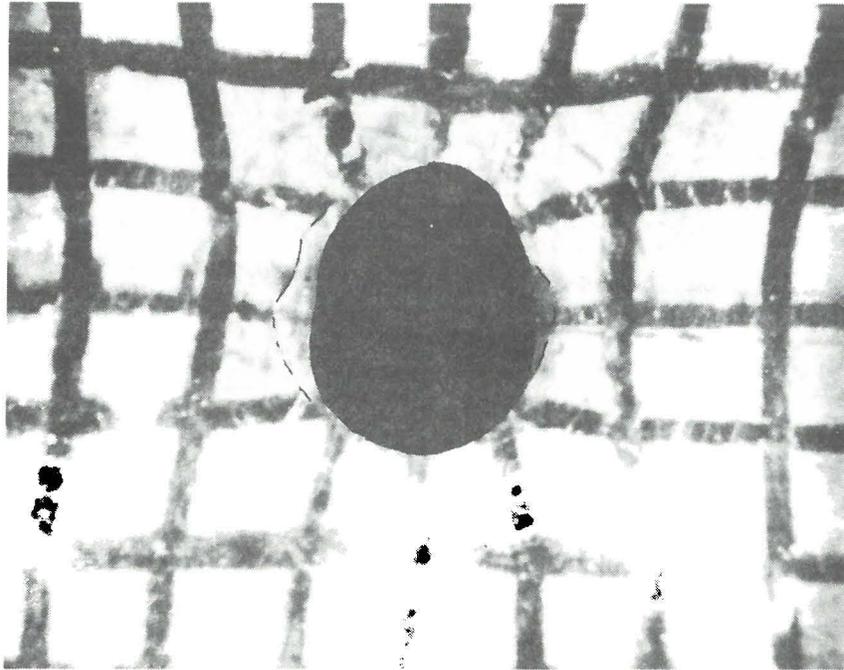


Abb. 8: Bruchloses Plastizieren. (Aus der Diplomarbeit N. Belewegas: „Das Verformungsverhalten von Bohrlöchern unter, in der Horizontalebene richtungsbetontem Primärdruck“, Institut für Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben).

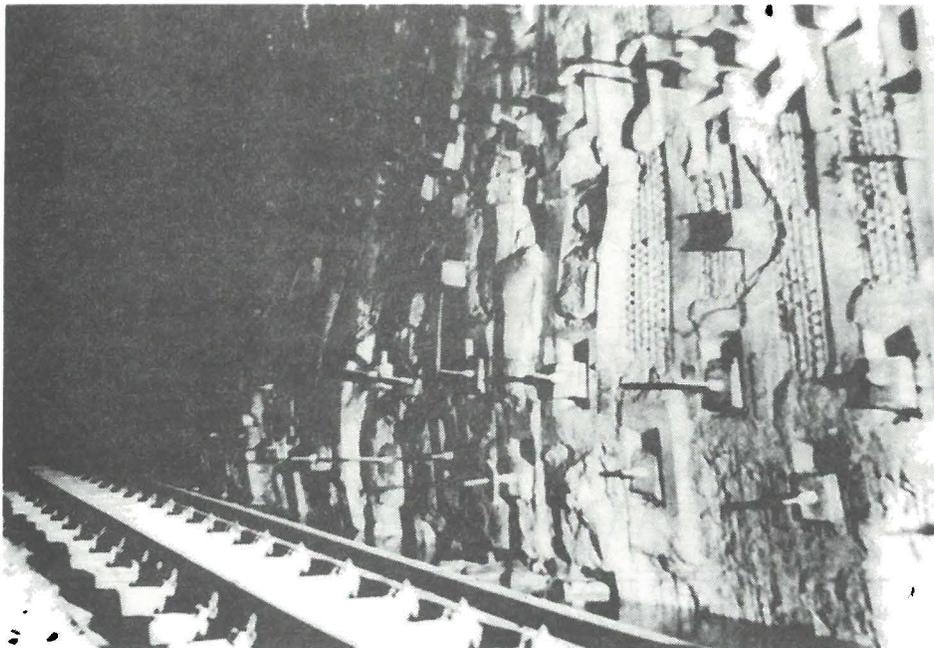


Abb. 9: Bruchloses Plastizieren ebener Tunnelstöße.



Abb. 10: Hereinwandern eines Schichtenpaketes unter Faltungs- und Scherbrüchen der Stöße. (Aus der Diplomarbeit H. Sochor: „Einfluß des Maßstabes und der Art der Lastaufbringung bei gebirgsmechanischen Modellversuchen für tiefliegende Hohlraumbauten“, Institut für Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben).



Abb. 11: Firstniederbruch

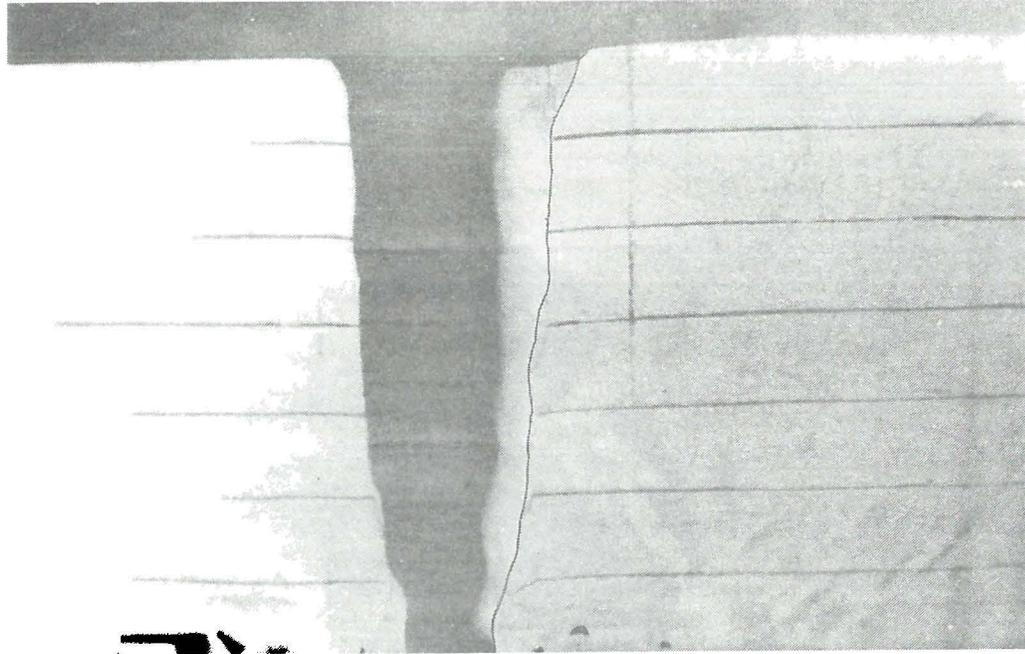


Abb. 12: Kaminartiger Niederbruch. (Aus der Diplomarbeit G. Golger: „Das Bruchverhalten des Firstbereiches von Hohlraumbauten in Lockerböden“, Institut für Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben).



Abb. 13: Ortsbrustversuch mit kaminartigem Niederbruch. (Aus der Diplomarbeit G. Knoll: „Ortsbrustnahe Bruchmechanismen oberflächennaher Hohlraumbauten“, Institut für Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben).

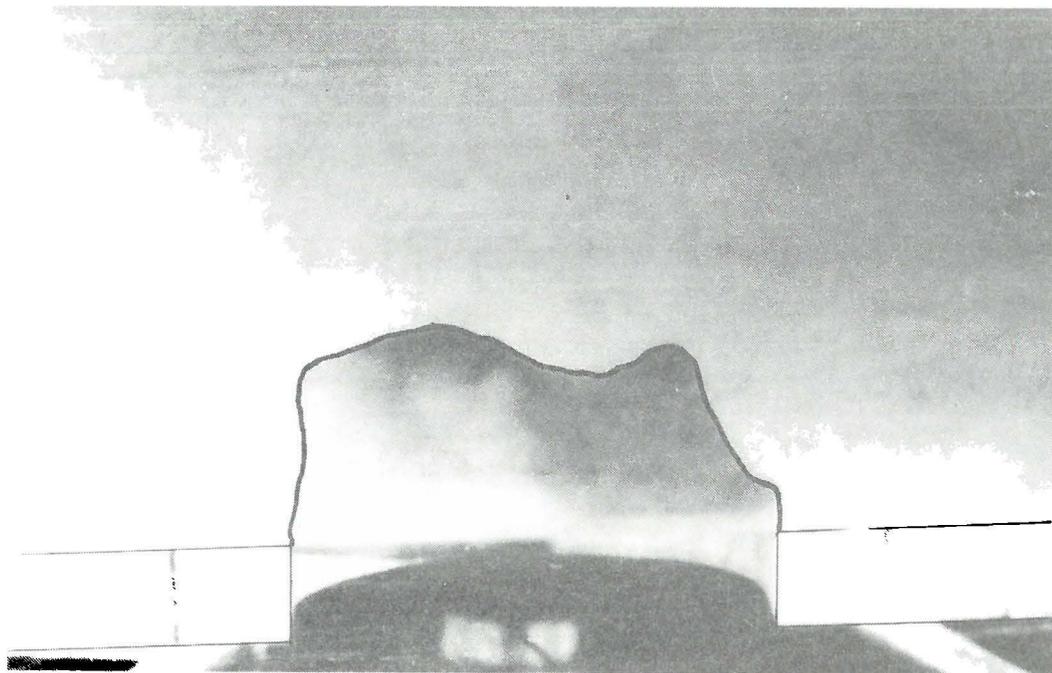


Abb. 14: Domausbruch. (Aus der Diplomarbeit G. Golger: „Das Bruchverhalten des Firstbereiches von Hohlraumbauten in Lockerböden“, Institut für Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben).