

Steifigkeitsabhängiges Scherverhalten von Fels

Von Manfred Blümel, Edward A. Button und Markus Pötsch

Scherparameter sind wesentlicher Bestandteil gängiger Bruchhypothesen, die das Bruchverhalten unter räumlichen Spannungszuständen beschreiben. Mit linearen beziehungsweise nichtlinearen Funktionen werden Bruchspannungszustände sowohl für intaktes Gestein als auch für Trennflächen beschrieben. Am häufigsten verwendet werden sicherlich die Bruchkriterien nach Mohr-Coulomb, Hoek-Brown oder Barton & Bandis, um nur einige zu nennen. Für alle Methoden, die das Gesteinsbeziehungsweise das Gebirgsversagen beschreiben, benötigt man Kennwerte, die mit Berechnungs- oder Vergleichsmethoden ermittelt oder durch Laborversuche bestimmt werden. Teilweise werden diese Parameter auch empirisch ermittelt. Unterschiedliche Randbedingungen, zum Beispiel das Spannungsniveau, Belastungsgeschwindigkeit und Belastungsrichtung, Probengröße, Wassergehalt, Temperatur und einige mehr, können das Bruchverhalten beeinflussen. Von sehr großer Bedeutung ist jedoch das Dehnungsverhalten (Steifigkeit, Volumenänderung) für den auftretenden Bruchmechanismus bei einer gegebenen Bettungsbedingung.

Zur Bestimmung der Bruchfunktion einer Probe werden traditionellerweise die Normalbeziehungsweise Seitendrucke in der Bandbreite der zu erwartenden In-situ-Spannungen ge-

Stiffness Controlled Shear Behaviour of Rock

The failure of rock and rock joints is described by failure criteria. However, the failure mechanisms are a very complex process and influenced by the boundary conditions. On the whole, the stress situation is affected by the volumetric strain behaviour. This paper shows some examples of how stiffness controlled procedures allow one to simulate realistic behaviour of rock failure for a given rock mass. The first example is dealing with block failure under different normal stiffness conditions. A joint model, which also considers constant normal boundary conditions as well as different discontinuity behaviour, is presented. The modelled behaviour is compared to the results of shear tests with a new shear test procedure. One part of the paper is showing results from several sets of direct shear tests performed with both constant normal load and normal stiffness procedures on brittle and weak phyllites. Tests were performed with parallel and perpendicular to the foliation with different boundary conditions. The results are discussed focusing on the differences in behaviour associated with the different boundary conditions.

Das Versagen von Fels und Trennflächen wird mit Hilfe von Bruchhypothesen beschrieben. Der Versagensmechanismus ist ein sehr komplexer Vorgang und hängt von den gegebenen Randbedingungen ab. Ein wesentlicher Faktor dabei ist der Spannungszustand, der sich beim Bruchvorgang aufgrund der behinderten Volumenänderung einstellt. In dieser Arbeit wird anhand einiger Beispiele gezeigt, wie durch steifigkeitsgeregeltere Versuchsprozeduren möglichst naturgetreue Bruchvorgänge simuliert werden und daraus zusätzliche Informationen für die Beschreibung der in situ Gebirgsverhältnisse gewonnen werden können.

Das erste Beispiel beschäftigt sich mit Kluftekörperversagen in Abhängigkeit von der seitlichen Bettung eines Blockkörpers. Ergebnisse aus Berechnungen mit einem Bruchmodell werden den Laborversuchsergebnissen gegenübergestellt. Weiters werden Ergebnisse aus Direktscherversuchen an Phyllitproben vorgestellt, welche mit konstanter Normallast wie auch unter konstanter Normalsteifigkeit getestet wurden. Die Unterschiede im Verhalten und ihre Bedeutung für das Gebirgsverhalten werden aufgezeigt.

wählt, die Versagenspunkte für jedes Spannungsniveau ermittelt und die Bruchfunktion über eine Kurvenanpassung bestimmt. Die Festigkeiten, die durch diese Prozeduren erhalten werden, können irreführend sein. Die Bettungsbedingung und der daraus resultierende Spannungszustand beeinflusst den Bruchmechanismus wesentlich. Ganz deutlich erkennbar ist dieses Phänomen im dreiaxialen Druckversuch bei Erhöhung des Seitendrucks. Zu Sprödbbruch neigende Proben verhalten sich bei einem höheren mittleren Hauptspannungsniveau zusehends duktil. Kennt man die seitliche Bettung in der nicht zusätzlich belasteten Richtung, können so maximal übertragbare Schubspannungen (Abgrenzung in der sonst meist nach oben offenen Bruchhypothese) und Dehnungen unter diesen gegebenen Randbedingungen ermittelt werden. Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Versuchen besteht also darin, daß sich der Spannungspfad, der letztendlich die Probe zu Bruch führt, aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen selbst einstellt und nicht wie sonst üblich Spannungen vorgegeben werden. Mit prozessorregelten servohydraulischen Prüfanlagen ist es möglich, steifigkeitskontrollierte Versuchsprozeduren durchzuführen. Ursprünglich wurden solche steifigkeitsabhängigen Versuche mit Hilfe von Stahlfedern simuliert.

Ein gut geeigneter Testaufbau mit steifigkeitskontrollierten Randbedingungen ist der Direktscherversuch (1). Er ermöglicht die Bestimmung der Scherparameter sowohl an Trennflächen als auch an intakten Proben. Vorgegeben wird dabei meist eine Initialspannung, die Schergeschwindigkeit und die Normalsteifigkeit. Durch die aufgezwungene Scherbewegung stellt sich aufgrund der daraus resultierenden Normaldehnung (Dilatation oder Kontraktion) der Spannungspfad entsprechend den gegebenen Materialeigenschaften ein. Der Spannungsverlauf in vertikaler und horizontaler Richtung mit den Dehnungen erlaubt eine genaue Bestimmung des Bruchverhaltens. Oft schwer zu interpretierende, scherwegabhängige Eigenschaften wie Kohäsion, Reibung und Dilatation bestimmen im steifigkeitskontrollierten Scherversuch direkt den Spannungspfad des Versuchs.

Simulation der Randbedingungen für Kluftkörperversagen

Untertägige Hohlräume sind ein typisches Beispiel für die Anwendung steifigkeitsabhängiger Berechnungsmodelle. Kluftkörper sind im umgebenden Gebirge nachgiebig eingespannt. Steifigkeitsgesteuerte Versuchsprozeduren bieten die Möglichkeit, die Parameterbestimmung durch individuelle Versuchsprozeduren an die jeweiligen Randbedingungen, zum Beispiel Gebirgssteifigkeit, anzupassen. Daneben spielen auch die geometrischen Randbedingungen des zu untersuchenden Ausschnitts eine große Rolle.

Im folgenden wird am Beispiel des Kluftkörperversagens eine Methodik vorgestellt, die es erlaubt, verschiedene Randbedingungen eines mechanischen Modells in einer Versuchsprozedur zu berücksichtigen und so repräsentative Werte der Modellparameter zu bestimmen. Die Kennwerte werden aus Versuchen, denen derselbe Spannungspfad zugrunde liegt wie dem mechanischen Modell, abgeleitet.

Kluftkörpermodell

Kluftkörper sind von Diskontinuitäten (Trennflächen, Störungen) gebildete, diskrete Blöcke im Gebirge. Beim Bau von Hohlräumen im Gebirge kann es zu Situationen kommen, die das Herausfallen dieser Kluftkörper erlauben. Grundlegende Arbeiten wurden hierzu von Goodman und Shi (2) geleistet. Mit ihrer Blocktheorie ist es möglich, kinematisch freie Kluftkörper (sogenannte Keyblocks) zu identifizieren. Die Bildung von Keyblocks bedingt verschiedene Voraussetzungen. Erstens muß der Block endlich sein (finite block). Weiters muß das Herausbewegen geometrisch möglich sein (untapered block). Außerdem muß der Vektor der äußeren Kräfte in den Hohlraum weisen. Sind diese drei Voraussetzungen nicht erfüllt, spricht man nicht von kinematisch freien Kluftkörpern. Diese können unter der Voraussetzung, daß keine neuen Trennflächen entstehen, nicht versagen.

Zwei grundlegende Mechanismen bestimmen für diese kinematisch freien Kluftkörper die Versagensform. Entweder gleiten sie auf den Trennflächen oder sie fallen aus dem Gebirgsverband. Im folgenden wird nur der Fallmechanismus betrachtet. Dieser ist insofern interessant, als fallende Kluftkörper nach der Blocktheorie immer versagen. Mögliche Reibungskräfte haben keine Auswirkung, da sich, starres Gebirge vorausgesetzt, die Trennflächen sofort öffnen. Eine Detailbetrachtung der Situation unter Berücksichtigung nachgiebigen Gebirges und Dilatation zeigt jedoch ein anderes Bild.

Auf die Flächen der Kluftkörper wirken die Gebirgsspannungen. Diese können unter bestimmten geometrischen Situationen und Primärspannungszuständen eine Stabilisierung des kinematisch freien Körpers bewirken. Die Rauigkeit der Trennflächen bewirkt eine Verspannung der Kluftkörper während der Verschiebung. Man spricht von rauigkeitsinduzierten Spannungen, die aus der behinderten Dilatation entstehen. Dies ist ein erheblicher Unterschied zum reinen Blockgleiten unter Gravitation, da in diesem Fall die Normalspannung in der Trennfläche konstant bleibt.

Für eingespannte Kluftkörper ist die Nachgiebigkeit des umgebenden Gebirges ein wesentlicher Faktor. Die Öffnung der Trennflächen während der Blockverschiebung ist umso geringer, je nachgiebiger das Gebirge ist. Diese Betrachtungsweise führt zu einem mechanischen Kluftkörpermodell, wie es im Bild 1 dargestellt ist.

Bild 1 Schematische Darstellung eines Kluftkörpers mit Winkelbeziehungen und den Scherversuchsparametern.

Fig. 1 Sketch of the block, including angular descriptions and shear parameters.

Aufgrund des Kraftsystems, das sich aus dem Eigengewicht und der Spannung ergibt, kann eine Stabilitätsanalyse durchgeführt werden. Die Aufgabe besteht darin, die Normal- und Schubspannungen auf den Blöcken richtig zu ermitteln. Anfangs wirkt ein Initialspannungssystem. Verschiebt sich der Block, kommt es zu einem Wechselspiel zwischen Block und Gebirge an der Trennfläche: die Normal- und Schubspannungen ändern sich. Dieses Wechselspiel wird von der Geometrie des Kluftkörpers, den Reibungs- und Rauigkeitseigenschaften der Trennflächen und der Nachgiebigkeit des Gebirges beeinflusst. Weitere Faktoren sind die Dilatation und Öffnung der Trennfläche, da die Scher- und Bewegungsrichtung nicht parallel sind. Maßgebender Parameter für die Öffnung ist der sogenannte Abtrennungswinkel β zwischen Scher- und Bewegungsrichtung.

Versuchsprozedur und Basisfunktion

In computergesteuerten Scherapparaten ist es möglich, das beschriebene Verhalten zu simulieren. Der Versuchsprozedur wird eine Basisfunktion zugrunde gelegt, in der die einzelnen Parameter verknüpft sind und welche die erwähnten Randbedingungen des Modells beschreibt. Die Steuerung der Kraftzylinder erfolgt so, daß die Basisfunktion immer erfüllt ist.

Die Parameter der Scherprozedur des oben beschriebenen Kluftkörpermodells sind:

- ⇨ Die Initialspannung σ_{ni} [MPa],
- ⇨ Die effektive Dilatation (Normalverschiebung) v [mm],
- ⇨ Die Scherverschiebung (Parallelverschiebung) u [mm],
- ⇨ Die Normalsteifigkeit („Gebirgssteifigkeit“) K [MPa/m] und
- ⇨ Der Abtrennungswinkel β [°].

Der Trennfläche wird eine Scherverschiebung u aufgezwungen. Diese Scherverschiebung bewirkt eine zugehörige Normalverschiebung, die aus zwei Anteilen besteht. Einerseits bewirkt die Neigung der Trennfläche zur Bewegungsrichtung eine Öffnung (Abtrennung) um den Betrag $u \cdot \tan \beta$. Die Rauigkeit wirkt dem entgegen, die einerseits zu einer Schließung der Trennfläche, andererseits zu einer Dilatation führt. Die Normalspannung wird nur durch die Abtrennung und die effektive Dilatation $-v - u \cdot \tan \beta$ beeinflusst.

Unter konstanter Normalsteifigkeit K ist die Normalspannungsänderung proportional zur Normalverschiebung. Damit ergibt sich als Basisfunktion:

$$\sigma = \sigma_{ni} + (-v - u \cdot \tan \beta) \cdot K$$

K und β werden manuell vorgegeben, u und v werden gemessen. Die Pressenkräfte werden so gesteuert, daß die oben angeführte Bedingung immer erfüllt ist.

Ergebnisse der Versuchsprozedur

In einer Versuchsreihe (3) wurde das Verhalten von künstlichen Trennflächen unter Scherung mit konstanter Normalsteifigkeit und einem Abtrennungswinkel untersucht. Als Probekörper dienten Quader aus Beton mit einer sägezahnförmigen Trennfläche. Die Scherfläche betrug 12 cm x 12 cm, in der sechs Zacken mit einer Flankenneigung von $21,8^\circ$ angeordnet wurden. Diese Zackenform soll eine gleichmäßige und vor allem nachvollziehbare Normalverschiebung gewährleisten. Um die Materialkennwerte festzustellen, wurden einaxiale Druckversuche beziehungsweise Schmidt-Hammer-Versuche und Mehrstufenscherversuche durchgeführt. Daraus ergaben sich die einaxiale Druckfestigkeit mit 65 MPa und der Restreibungswinkel mit 37° . In den Scherversuchen wurden die Versuchskörper mit verschiedenen Normalsteifigkeiten und Abtrennungswinkeln unter der oben beschriebenen Prozedur untersucht. Die Normalsteifigkeiten wurden mit 100, 1 000 und 10 000 MPa/m und die Abtrennungswinkel mit 15, 25, 30, 35 und 40° variiert. Bild 2 zeigt das Scherverhalten dieser Trennfläche unter einer Normalsteifigkeit von 10 000 MPa/m und verschiedenen Abtrennungswinkeln. Alle Spannungspfade werden durch eine untere und eine obere Einhüllende begrenzt. Bei einem Abtrennungswinkel von 15° überwiegt anfangs die Dilatation gegenüber der Abtrennung, was eine Erhöhung der Normalspannung und damit einen erhöhten Scherwiderstand bewirkt. Die Zacken werden nach geringer Normalverschiebung durchgeschert. Der Spannungspfad berührt die obere Einhüllende, fällt dann aber auf die untere Einhüllende ab und folgt dieser bis zum Nullpunkt. Die Neigung dieser Geraden (45°) ist steiler als die der Restreibungsgeraden unter konstanter Normalspannung (37°), was durch den zusätzlichen Normalspannungsgradienten aufgrund der Abtrennung begründet ist. Ist der Abtrennungswinkel größer als die Flankenneigung ($21,8^\circ$), nimmt die Normalspannung kontinuierlich ab. Die Probe kann auf den Flanken gleiten, was letztendlich zu einer stetigen Kluftöffnung führt. Das Durchschneiden der Zacken erfolgt nach Patton (4) nur, wenn die Übergangsspannung überschritten wird. Der Spannungspfad strebt die obere Einhüllende an, wobei die Normalspannung kontinuierlich abnimmt. Die Neigung der oberen Einhüllenden (51°) ist flacher als die Neigung der Bruchgeraden nach Patton ($\varphi + i = 58,8^\circ$). Dieser Umstand erklärt sich aus der Tatsache, daß die konventionellen Bruchgeraden unter konstanter Normalspannung ermittelt werden. Erwartungsgemäß nähern sich die Neigungen der oberen und unteren Einhüllenden unter niedrigeren Normalsteifigkeiten den Neigungen der Restreibung beziehungsweise Bruchgeraden nach Patton an.

Bild 3 zeigt den Vergleich des Scherverhaltens unter verschiedenen Normalsteifigkeiten mit einem Abtrennungswinkel von 40° . Das unterschiedliche Verhalten ist in den Spannungspfa-

Bild 2 Darstellung des Scherverhaltens abhängig vom Abtrennungswinkel bei einer Normalsteifigkeit von 10 000 MPa/m.

Fig. 2 *Diagram of the shear behaviour depending on the detachment angle for normal stiffness of 10 000 MPa/m.*

Bild 3 Darstellung des Scherverhaltens abhängig von der Normalsteifigkeit bei einem Abtrennungswinkel von 40° .

Fig. 3 *Diagram of the shear behaviour depending on the normal stiffness for a detachment angle of 40° .*

den ganz deutlich erkennbar. Hohe Normalsteifigkeit hat eine rasche Abnahme der Normalspannung zur Folge. Der Spannungspfad strebt die obere Einhüllende an und folgt dieser dann in den Nullpunkt. Die Rauigkeit der Trennfläche spielt demnach auch im Postpeak-Bereich eine wesentliche Rolle. Unter niedriger Normalsteifigkeit bleibt die Normalspannung über längere Bereiche auf einem hohen Niveau. Der Spannungspfad berührt die obere Einhüllende nur und fällt dann auf die untere Einhüllende ab. Ein vollständiges Durchschneiden der Zacken hat stattgefunden. Das Postpeak-Verhalten wird demnach hauptsächlich durch die Reibungseigenschaften des Materials dominiert.

Auch das Verschiebungsverhalten zeigt eine starke Abhängigkeit vom Abtrennungswinkel und der Normalsteifigkeit. Die anfängliche Mobilisierung der Schubspannungen wird durch die Schersteifigkeit beschrieben. Als Schersteifigkeit wurde die Sekantensteifigkeit bei 50 % der maximalen Scherspannung definiert. Die erforderlichen Verschiebungswege zum Erreichen des maximalen Scherwiderstands liegen im Bereich von 0,5 bis 1 mm. Bei Erhöhung der Normalsteifigkeit von 100 auf 10 000 MPa/m erhöhte sich die Schersteifigkeit von 22 000 auf 29 000 MPa/m. Im Postpeak-Bereich sind die Unterschiede in den Ergebnissen noch deutlicher. Bei hoher Normalsteifigkeit sind bereits, je nach Größe des Abtrennungswinkels, nach 1,5 bis 6 mm Scherverschiebung die aufnehmbaren Schubspannungen stark reduziert. Bei geringer Normalsteifigkeit ist nach 25 mm Scherverschiebung (maximale Verschiebung des Scherapparats) je nach Abtrennungswinkel noch 30 bis 40 % der Spitzenfestigkeit an Scherwiderstand vorhanden.

Bruchmodelle unter konstanter Normalsteifigkeit

Mit den üblicherweise angewandten Kluftmodellen ist man nicht in der Lage, dieses Kluftverhalten adäquat zu beschreiben. Das Modell von Mohr-Coulomb beispielsweise berücksichtigt nur das Bruchverhalten. Das Kluftmodell von Barton und Bandis (5, 6) berücksichtigt die Abhängigkeit der Spannungen vom Verschiebungswege (elastisch-plastisch mit Verfestigung) sowohl parallel (Scherweg) als auch normal (Dilatation) zur Kluft. Die Formulierung des Scherverhaltens wurde aber unter konstanter Normalspannung abgeleitet. Um das Verhalten dieses Modells unter konstanter Normalsteifigkeit simulieren zu können, wurde eine inkrementelle Formulierung von Kluftmodellen (Saeb und Amadei (7)) verwendet. In dieser Formulierung werden Verschiebungsinkremente mittels der Kluftsteifigkeitsmatrix in Relation zu den Spannungsinkrementen gesetzt. Bild 4 zeigt das Kluftmodell, das die Kluftnormal- und Schersteifigkeit, die äußere Normalsteifigkeit, die Dilatation und den Abtrennungswinkel berücksichtigt. Wesentlich ist, daß sowohl die Scherverschie-

Bild 4 Kluftmodell mit Berücksichtigung der Normalsteifigkeit und des Abtrennungswinkels.

Fig. 4 Joint model, including normal stiffness and detachment angle.

bung als auch die Normalverschiebung der Kluft betrachtet wird. Damit kann die äußere Normalsteifigkeit (Gebirgssteifigkeit) berücksichtigt werden. Die Bilder 5 und 6 zeigen das beobachtete Kluftverhalten und die Simulation mit dem Modell von Barton und Bandis (BB) unter konstanter Normalsteifigkeit. Im Modell wurden verschiedene Rauigkeitskoeffizienten (JRC) verwendet. Die Diagramme zeigen doch eine große Diskrepanz zwischen Versuch und Simulation, obwohl der qualitative Verlauf durchaus beschrieben werden kann. Diese Diskrepanz hat verschiedene Ursachen. Die Formulierung des Modells von Barton und Bandis basiert auf Versuchen an natürlichen Trennflächen. In den oben erwähnten Versuchen wurden künstliche Trennflächen mit einer speziellen Geometrie untersucht. Es ist ersichtlich, daß mit dem BB-Kluftmodell die spezielle Geometrie beziehungsweise Oberflächenstruktur der Trennfläche nur insofern berücksichtigt werden kann, als der Rauigkeitskoeffizient passend gewählt wird. Der Verlauf der Schubspannungen bezüglich der Scherverschiebung ist durch eine Funktion, in welcher der JRC als Proportionalitätsfaktor wirkt, vorgegeben. Das steifigkeitsabhängige Scherverhalten von Trennflächen ist aber ganz wesentlich von der tatsächlichen Oberflächenstruktur abhängig, da zusätzliche Normalspannungen von der behinderten Dilatation herrühren. Diese können nur durch eine adäquate Beschreibung der Kluftoberfläche richtig berücksichtigt werden. Auch werden die verschiedenen Versagensmechanismen (Aufgleiten und Scheren durch die Zacken) nicht ausdrücklich unterschieden. Plötzliche Änderungen im Spannungsniveau durch Abnahme der Rauigkeit können somit nicht berücksichtigt werden.

Steifigkeitsgesteuerte Scherversuche an intaktem Fels

Der Einsatz direkter Scherversuche eignet sich sehr gut, um an geschichtetem, teilweise auch stark gestörtem Probenmaterial, zum Beispiel Phylliten, mechanische Eigenschaften zu ermitteln. Es ist wesentlich einfacher, Proben für den Direktscherversuch zu gewinnen, als intakte bearbeitbare Bohrkerne aus gestörtem Probenmaterial für Triaxialversuche. Um den Einfluß der Randbedingungen auf die Versuchsergebnisse zu demonstrieren, werden im folgenden Abschnitt die Ergebnisse aus Versuchen „intakter“ Phyllitproben vorgestellt. Dabei werden Scherversuche mit konstanter Normalsteifigkeit mit Ergebnissen aus spannungsgesteuerten Prozeduren verglichen.

Die folgende Versuchsreihe wurde an gestörten Chloritphylliten durchgeführt. Die Proben wurden an unterschiedlichen Orten eines aktuellen Tunnelvortriebs gewonnen. Die Proben wurden jeweils parallel und normal zur Schieferung geschert, um das anisotrope Verhalten zu

Bild 5 Gegenüberstellung Berechnung und Versuch für einen Abtrennungswinkel von 15° und Normalsteifigkeit von 10 000 MPa/m.

Fig. 5 Comparison calculation and test for a detachment angle of 15° and a normal stiffness of 10 000 MPa/m.

Bild 6 Gegenüberstellung Berechnung und Versuch für einen Abtrennungswinkel von 40° und Normalsteifigkeit von 1 000 MPa/m.

Fig. 6 Comparison calculation and test for a detachment angle of 40° and a normal stiffness of 1 000 MPa/m.

untersuchen. Die Unterschiede im Verhalten der Laborversuche und ihre Bedeutung für das Gebirgsverhalten werden aufgezeigt.

Konstante Normalspannung (Constant Normal Load - CNL)

Die Versuche wurden mit einer Mehrstufenprozedur unter konstanter Normalspannung durchgeführt. In jedem Versuch wurden vier Versagenspunkte ermittelt. Bild 7 zeigt die Bruchspannungen für Versuche, die parallel beziehungsweise normal zur Schieferung gesichert wurden. Man sieht, daß beide Versuche fast dieselbe Bruchfunktion ergeben. Das läßt darauf schließen, daß das anisotrope Verhalten, das üblicherweise mit Phylliten verbunden ist, durch tektonische Verformung mechanisch eliminiert wurde. Habimana (8) berichtet von ähnlichen Ergebnissen aus Triaxialversuchen an tektonisch gesicherten Phyllitschiefern, die während des Baus eines Kraftwerks in der Schweiz gewonnen wurden. Außerdem erwähnt Habimana ein Abweichen der Bruchfunktion vom nichtlinearen Hoek-Brown Typ zur Mohr-Coulomb-schen Bruchgeraden mit zunehmender Tektonisierung. Diese Tatsache wurde auch in den Versuchen dieses Artikels beobachtet. In den Artikeln von Habimana wird nur das Bruchkriterium diskutiert. Das Spannungs-Dehnungsverhalten bleibt unerwähnt. In den Versuchen zeigte sich sehr deutlich, daß ein Ignorieren des volumetrischen Dehnungsverhaltens zu einem Über- oder Unterschätzen der vorhandenen Festigkeit der Probe unter einem bestimmten Spannungsniveau führen kann.

Bild 8 zeigt die Vertikalverschiebung gegen die Scherverchiebung von zwei gleichen Versuchen. Die zwei Diagramme zeigen den großen Unterschied im Verhalten abhängig von der Orientierung. Die Probe, die parallel zur Schieferung gesichert wurde, kontrahiert etwa 4,6 mm. Das ist etwas weniger als die Hälfte der Kontraktion der Probe, die normal zur Schieferung gesichert wurde (8,4 mm bei derselben Scherverchiebung). Dieses unterschiedliche Verhalten hatte keine Auswirkung auf die Bruchfunktion (unter diesen Randbedingungen). Diese Proben wurden jedoch unter feuchten Bedingungen ohne Berücksichtigung des möglichen Einflusses des Porenwasserdrucks getestet. Bei relativ undurchlässigen gesättigten Proben bewirkt die Kontraktion unter CNL eine Abnahme der effektiven Spannung, was zu einer geringeren Festigkeit führt. Anisotropes Materialverhalten bezieht sich nicht nur auf die Festigkeit des Materials, da auch bei einer Richtungsunabhängigkeit der Bruchfestigkeiten eventuell richtungsabhängige Dehnungen einen wesentlichen Einfluß auf das In-situ-Verhalten darstellen können.

Bild 9 zeigt, daß die Dehnungen bei Erreichen der maximalen Scherfestigkeiten unterschiedlich sind. Die parallel zur Schieferung gesicherte Probe versagt bereits beim halben Verschie-

Bild 7 Bruchspannungen aus Mehrstufenversuchen (CNL) an Phylliten.

Fig. 7 Failure stress from multiple stage shear tests (CNL) on Phyllites.

Bild 8 Verschiebungsverlauf (Kontraktion).

Fig. 8 Development of displacements (contraction).

bungsweg im Vergleich zur normal zur Schieferung gescherten Probe. Dieser Unterschied kann auf die verschiedenen Versagensmechanismen, welche die Proben aufgrund ihrer unterschiedlichen Struktur erleiden, zurückgeführt werden. Die parallel zur Schieferung gescherte Probe verformt sich überwiegend durch einfaches Gleiten entlang der Schieferungsflächen. Bei der normal zur Schieferung gescherten Probe ist der Bruchmechanismus komplexer und daraus resultiert auch eine höhere Dehnung bis zur Spitzenfestigkeit. Durch die aufgezwungenen Dehnungen treten verschiedene Verformungsmechanismen auf. Beispielsweise führt Knicken zusammen mit Starrkörperrotation, Faltung und Schlupf in der Schieferung zu einer Neuorientierung der Teilchen und Ausbildung einer Scherzone mit Eigenschaften, die ähnlich der ursprünglichen Schieferung nach großen Verschiebungen sind.

Konstante Normalsteifigkeit (Constant Normal Stiffness – CNS)

Es gibt nur wenig Information über den Effekt von Dilatation oder Kontraktion auf die Bruchspannung. Um den Einfluß volumetrischer Dehnungen auf die Festigkeit einer Probe festzustellen, werden steifigkeitsgesteuerte Randbedingungen verwendet. Zur Demonstration werden CNS-gesteuerte Versuchsprozeduren beziehungsweise Prozeduren mit unendlicher Normalsteifigkeit (keine Normalverschiebung zugelassen) herangezogen. Die verwendeten Proben sind ähnlich zu jenen, die oben beschrieben wurden. Zwei Proben wurden vom selben Block aus Chloritphyllit entnommen. Je eine Probe wurde parallel beziehungsweise normal zur Schieferung getestet. Die Probe, die parallel zur Schieferung getestet wurde, wurde auch unter CNL-Randbedingungen, wie unten beschrieben, getestet.

Bild 10 zeigt den Spannungspfad des CNS-Versuchs der parallel zur Schieferung gescherten Probe. Die Initialspannung betrug 0,3 MPa, was in etwa der In-situ-Vertikalspannung entspricht. Der unmittelbare Abfall der Normalspannung ist typisch für eine kontraktierende Probe unter CNS. Der Test mußte versuchsaufbaubedingt abgebrochen werden. Um mehr Information über diese Probe zu bekommen, wurde eine zweite Belastungssequenz unter CNL ausgeführt. Das Spannungsniveau wurde auf das ursprüngliche Niveau zurückgesetzt. Dann wurde die Probe unter vier Normalspannungsniveaus geschert. Der Spannungspfad und die Versagenspunkte sind im Bild 11 und die Spannung und Normalverschiebung gegen die Scherverchiebung im Bild 12 dargestellt. Die anfängliche Schleife stellt die CNS-Prozedur dar. Man sieht, daß die Änderung der Randbedingungen keinen Einfluß auf die praktisch lineare Bruchfunktion hatte. Der größte Unterschied besteht darin, daß unter der steifigkeitsgesteuerten

Bild 9 Scherspannung über den Scherweg.

Fig. 9 *Shear stress versus shear displacement.*

Bild 10 Spannungspfad einer Chloritphyllitprobe (CNS).

Fig. 10 *Stress path for a chlorite phyllite (CNS).*

Bild 11 Spannungspfade CNS und CNL mit Versagenspunkten.

Fig. 11 *Stress path CNS and CNL with failure points.*

Bild 12 Spannungen und Verschiebungen, CNS und CNL Prozedur.

Fig. 12 *Stresses and displacements, CNS and CNL procedures.*

Randbedingung die Probe die aufgebrachte Initialspannung über die Scherverschiebung nicht halten konnte. Bild 13 zeigt den Spannungspfad der Probe, die normal zur Schieferung gesichert wurde. Die Initialspannung war etwas höher als die für die parallel zur Schieferung gesicherten Proben aufgrund des unterschiedlichen Querschnitts der Proben. Nach der anfänglichen Kontraktionsphase dilatiert die Probe, und es kommt zu einer Erhöhung der Normalspannung. Bei Erreichen der maximalen Scherspannung verharrt der Spannungszustand über einen größeren Scherweg hinweg und bildet den „Punkt“ auf dem Spannungspfad. Bild 14 zeigt das Spannungs-Verschiebungsdiagramm. Die Kurve beginnt bei einer Scherverschiebung von -0,5 mm aufgrund des Aufbringens der Konsolidierungsspannung und der Tatsache, daß die Schieferung leicht in Scherrichtung fällt. Bei Erreichen der größten Scherspannung verformte sich die Probe etwa 1 cm, bevor sie zu kontrahieren begann. Dieser Verformungsmechanismus ist unter kataklastischem Fließen bekannt und ist wahrscheinlich der vorherrschende Verformungsmechanismus in einem als druckhaft beschriebenen Gebirge (keine offensichtlichen Verformungsebenen oder Volumenzunahme). Bild 15 zeigt diese Probe vor Ausbau aus der Scherbüchse. Die Probe ist etwa 1,8 cm hoch und 8 cm lang. Wie oben erwähnt können die Verformungsmechanismen ziemlich komplex sein. Die interne Struktur der Probe ist stark verzerrt. Es gibt keine offensichtliche Versagensebene, obwohl einige Scherflächen unterschieden werden können. Zonen um steifere Einschlüsse sind gefaltet, und die Entwicklung von P-Scherungen hat begonnen. Vorherrschende Versagensmechanismen sind der „inter particle (layer) slip“ und die Faltung, die von den Unterschieden in den lokalen Eigenschaften abhängig sind.

Um den Unterschied im Verhalten beider Proben vergleichen zu können, wurden beide Spannungspfade der CNS-Versuche im Bild 16 dargestellt. Inkludiert sind auch die Versagenspunkte und die Bruchgerade der CNL-Teile der Versuche. Die erreichte maximale Schubspannung der normal zur Schieferungsrichtung gesicherten Probe ist 3,25mal höher als die parallel gesicherte Phyllitprobe. Interessant ist, daß sich die Bruchfunktion während des residuellen Teils des CNS-Versuchs jener der parallel zur Schieferung gesicherten Probe annähert. Die interne Struktur eines schwachen Materials ordnet sich unter aufgezwungener Verformung neu an, um den Reibungswiderstand zu minimieren (Scherkonzentration). Da beide Proben die selben internen Eigenschaften aufweisen (Mineralbestand, Korngrößenverteilung, kohäsive Bindung), nähern sich im Restfestigkeitsbereich die Bruchfunktionen an. Es ist dieselbe Reaktion, die bei den CNL-Versuchen beobachtet wurde. Die Differenz in den Festigkeiten aufgrund der ursprünglichen internen Struktur kann jedoch

Bild 13 Spannungspfad normal zur Schieferungsrichtung.

Fig. 13 *Stress path perpendicular to foliation.*

Bild 14 Spannungsverlauf über die Scherverschiebungen.

Fig. 14 *Stress distribution vs. shear displacements.*

Bild 15 Chloritphyllit normal zur Schieferung mit CNS Prozedur. Bildausschnitt ca. 8 x 1,8 cm.

Fig. 15 *Chlorite Phyllite sheared Perpendicular to the foliation under CNS conditions. Sample view is approximately 8 cm by 1,8 cm.*

Bild 16 Darstellung der Spannungspfade in Abhängigkeit zur Scherrichtung (CNS).

Fig. 16 *Diagram of the stress paths depending on the shear direction.*

nur mit CNS-Prozeduren ermittelt werden. Versuchsergebnisse, die nicht mit geeigneten Randbedingungen ausgeführt wurden, können irreführende Schlußfolgerungen nach sich ziehen. Beinahe alle Scherfestigkeitskriterien, welche die Festigkeitszunahme beziehungsweise -abnahme infolge von Dilatation beziehungsweise Kontraktion berücksichtigen, verwenden Versuchsprozeduren, die diese Eigenschaften nicht erheben. Die daraus folgenden Spannungs-Dehnungs-Beziehungen können deshalb paradoxe Werte annehmen. Das Dilatationsverhalten ist eine Funktion der äußeren Randbedingungen und der inneren Eigenschaften des Materials (Steifigkeit, Zugfestigkeit, Kornform und -größe). Die oben erwähnten Ergebnisse beziehen sich auf das Verhalten von intaktem, schwachem, geschertem Phyllit. Um zu zeigen, daß diese Prozeduren auch für kompetentere Proben verwendet werden können, werden drei Versuche an harten, intakten Proben aus Quarzphyllit präsentiert.

CNS – Intakter harter Phyllit

Um das anisotrope Scherverhalten von hartem Quarzphyllit und schieferigem Quarzit zu bestimmen wurden drei Proben, die von einem aktuellen Tunnelprojekt stammen, untersucht. Zwei Proben mit unterschiedlichem Glimmer- und Quarzanteil wurden parallel zur Schieferung (Probe T1 und Probe T2) und eine Probe normal zur Schieferung (Probe T3) geschert. Bild 17 zeigt die Spannungspfade dieser Proben.

Die Proben T1 und T2 beginnen in etwa bei gleichem Spannungsniveau zu versagen. Ab diesem Spannungszustand tritt ein Versagen an der Schieferungsfläche auf, und die Probe beginnt zu gleiten. Danach sinkt der Scherwiderstand der Probe T1 ab, wobei die Normalspannung zunimmt. In Probe T2 hingegen nimmt der Scherwiderstand mit zunehmender Normalspannung zu. Bild 18 zeigt die Spannungs-Verschiebungsdiagramme dieser Versuche. Man sieht, daß nur eine minimale Verschiebung (0,3 bis 0,6 mm) notwendig war, um die Spitzenfestigkeit zu erreichen. Die induzierte Normalspannung dieser zwei Proben ist ziemlich unterschiedlich. Probe T1 weist eine lineare Zunahme bis knapp unter den Versagenspunkt auf und wächst dann nicht-linear bis zum Spitzenwert. Die Normalspannung der Probe T2 nimmt schnell und linear bis zum Spitzenwert zu, dann nimmt sie leicht ab, bevor sie während des residuellen Scherens schnell abfällt. Diesen Verhaltensunterschied und die daraus resultierenden Variationen der Spannungen aufgrund der Dilatation oder Kontraktion konnten mit traditionellen spannungsgesteuerten Versuchen nicht beobachtet werden. Der Spannungspfad des Versuchs T3, mit in etwa der gleichen Glimmer-Quarz-Verteilung wie T2, aber normal zur Schieferungsrichtung geschert, zeigt eine wesentlich größere Festigkeit. Interessant ist die allmähliche Entwicklung

Bild 17 Spannungspfade für Quarzphyllite (CNS).

Fig. 17 *Stress paths for Quartz Phyllites (CNS).*

Bild 18 Spannungs-Verschiebungsdiagramme (CNS).

Fig. 18 *Stress-displacement diagram (CNS).*

der Spannungen und das Fehlen einer ausdrücklichen Spitze in den Schubspannungen im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchen. Bild 19 zeigt das Spannungs-Verschiebungsverhalten dieser Probe. Man sieht, daß die Verschiebung bis zur Spitzenscherfestigkeit etwa 3,25 mm beträgt, während sie für die Normalspannung etwa 5 mm beträgt. Diese Werte sind wesentlich höher als die gemessenen 0,3 beziehungsweise 0,6 mm Verschiebung der vorangegangenen Versuche, die man typischerweise für intaktes sprödes Gestein erwarten würde, um einen durchgehenden Bruch zu auszubilden. Bild 20 zeigt diese Probe nach dem Versuch vor dem Ausbau aus der Scherbüchse.

Die untersuchten Proben zeigten einen komplexen Verformungsmechanismus. Das Vorhandensein reibungsarmer Schieferungsebenen mündet in antithetischen Scherungen entlang der Schieferung unter Biegung und Rotation der starken quarzitischen Lagen. Wurden die Biegezugspannungen groß genug, sind die Lagen unter Bildung von diskreten Blöcken gebrochen. Diese Blöcke mußten dann rotieren, um die Verformung mitmachen zu können. Dieser „Bookshelf Mechanismus“ wurde vollständig von Mandl (9) beschrieben. Die Ergebnisse dieser Versuche sind auf numerische Modelle nicht direkt anwendbar, ohne einen erheblichen Aufwand in die Rückrechnung der verschiedenen Materialparameter zu investieren. Sie sind jedoch grundlegend für das Verständnis, wie sich die Spannungen bei so einem komplexen Bruchvorgang entwickeln.

Quellennachweis

1. Blümel, M. ; Bezat, F.A.: *Advanced Control Techniques for Direct Shear Testing of Jointed Rock Specimens*. W.A. Marr and C.E. Fairhurst (Hrsg.): *Nondestructive and Automated Testing for Soil and Rock Properties*, ASTM STP 1350, American Society for Testing and Materials, 1998.
2. Goodman, E.R. ; Shi, G.: *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
3. Pötsch, M.: *Influence of the three-dimensional stress condition at the tunnel face on the stability of removable blocks*. Diplomarbeit, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, 2002.
4. Patton, F.D.: *Multiple modes of shear failure in rock*. Proc. 1st Congress Int. Soc. Rock Mech., S. 509 - 513. Lisbon, 1966.
5. Barton, N. ; Bandis, S.: *Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice*. Barton & Stephansson (Hrsg.): *Rock Joints*, S. 603-610. Rotterdam: Balkema, 1990.
6. Bandis, S.C. ; Lumsden, A.C. ; Barton, N.: *Fundamentals of rock joint deformation*. In: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.* 22 (1983), S. 112-140.
7. Saeb, S. ; Amadei, B.: *Modelling Rock Joints under Shear and Normal Loading*. In: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 29 (1992), Nr. 3, S. 267-278.
8. Habimana ; Descoedres ; Labiouse: *Influence of tectonisation on geomechanical parameters of cataclastic rocks: experience from Cleuson, Dixence project*. 2nd International symposium on Hard Soils & Soft Rocks. Napoli, 12-14 Oct. 1998, S.529-536. Rotterdam: Balkema, 1998.
9. Mandl, G.: *Mechanics of Tectonic Faulting: Models and Basic Concepts*. Amsterdam: Elsevier, 1988.

Bild 19 Spannungs-Verschiebungsdiagramme (CNS).

Fig. 19 *Stress-displacement diagram (CNS).*

Bild 20 Probe T3 (intakte Phyllitprobe, Schieferungsrichtung normal) nach dem Scherversuch.

Fig. 20 *Probe T3 (intact Phyllite, perpendicular to foliation) after the shear test.*

Autoren

Manfred Blümel, Edward Button, Markus Pötsch, Institut für
Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz,
Rechbauerstrasse 12, A-8010 Graz, Österreich, E-Mail
tunnel@fmt.tu-graz.ac.at