Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 89 (1971)
Heft: 30

Artikel: Direkter Scherversuch im Laboratorium an Felsproben mit Klüften
Autor: Locher, H.G.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84944

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Direkter Scherversuch im Laboratorium an Felsproben mit Klüften

DK 624.121.001.4

Von H. G. Locher, Bern

Einleitung

Die moderne Bautechnik umfasst je länger je mehr auch grosse Bauten im Fels. Beispiele sind: grosse Kavernen für Kraftwerkzentralen und Lagerräume, ja sogar Kirchen, Tunnel für Verkehrswege, Sicherung von Felsböschungen. Mit dem wachsenden Umfang steigt auch das Bedürfnis nach zuverlässigeren Bemessungsmethoden. Die bisherigen empirischen Methoden genügen im allgemeinen für kleinere Objekte, sie können aber selten auf die Verhältnisse bei grossen Bauten erweitert werden. Es ergäben sich bei einer solchen Erweiterung unwirtschaftliche Abmessungen, dennoch bliebe die Frage nach der vorhandenen Sicherheit offen.

Moderne Bemessungsmethoden müssen auf den Erkenntnissen der Felsmechanik aufbauen. Diese junge Wissenschaft hat in den letzten Jahren dank grosszügiger Versuchsprogramme praktisch und dank den Möglichkeiten der modernen Rechenanlagen auch theoretisch grosse Fortschritte gemacht. Es wurden Modelle für das Verhalten des Gebirges unter dem Einfluss der Bauwerke aufgestellt; diese erlauben, verschiedene Bemessungsannahmen, zum Beispiel für die Auskleidung einer Kaverne und Felssicherung mit Ankern, durchzurechnen.

Eine solche statische Überprüfung liefert nur dann einigermassen wirklichkeitsgetreue Ergebnisse, wenn die Materialkennziffern des Gebirges richtig angenommen und in die Berechnung eingeführt werden. Und darin liegt die grosse Schwierigkeit für die praktische Anwendung der Felsmechanik. Einmal ist die Anzahl der Einflussgrössen ein vielfaches derjenigen der Bodenmechanik. Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Grössen, die bei Fels bzw. bei Boden die Scherfestigkeit beeinflussen. Zweitens ist die Bestimmung der einzelnen Grössen vielfach sehr umständlich und erfordert grossmassstäbliche Versuche und/oder intensive Studien. Daher kommen vollumfängliche felsmechanische Untersuchungen aus Zeit- und Kostengründen nur für sehr grosse Bauobjekte in Frage.

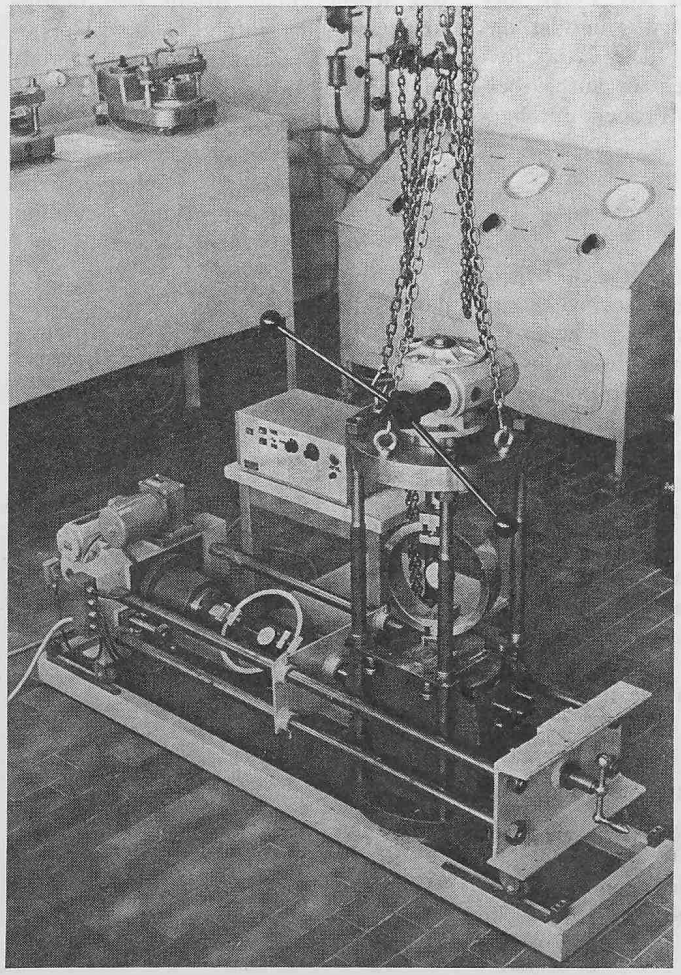
Tabelle 1. Faktoren, die die Scherfestigkeit beeinflussen. Vergleich zwischen Fels und Boden

Fels		Boden	
Gesteinsmasse			
Reibungswinkel des Gesteins	Φ_G	Reibungswinkel	Φ'
Kohäsion des Gesteins	c_G	Kohäsion	c'
		Porenwasserspannung	
Für jedes Kluftsystem[1])			
Stellung (Orientierung im Raum)			
Kluftabstand			
Durchtrennungsgrad			
Reibungswinkel auf der Kluftfläche	Φ_{Ki}		
Kohäsion auf der Kluftfläche	c_{Ki}		
Kluftwasserdruck			

[1]) Meist sind mindestens drei, oft bis 10 Kluftsysteme in verschiedenen Richtungen vorhanden.

Die praktische Erfahrung zeigt, dass einzelne Grössen auf das Verhalten des Gebirgsinnern überwiegenden Einfluss haben. Jeder Stollenbauer weiss zum Beispiel, dass die Festigkeit des Gebirges massgeblich von der Klüftung und vom Charakter der Kluftflächen bestimmt wird. Daher ist eines der wichtigsten Probleme die Scherfestigkeit auf den Kluftflächen, denen die beiden Beiträge im vorliegenden Heft gewidmet sind.

Bild 1. Felsschergerät, Gesamtansicht



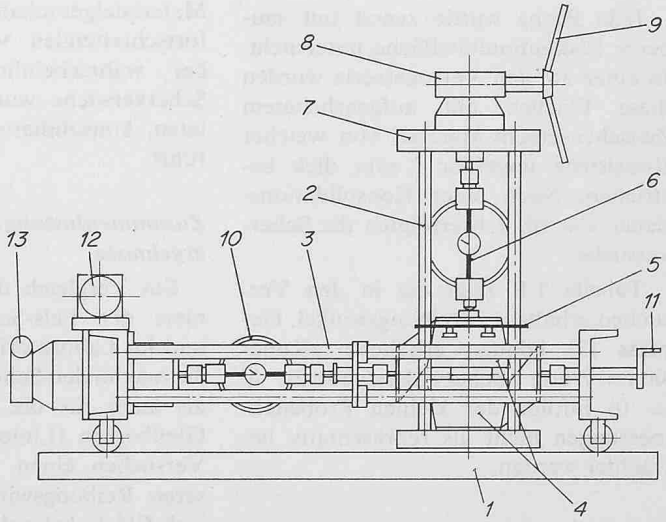


Bild 2. Schematischer Aufbau des Gerätes

1 Grundrahmen
2 Vertikaler Druckteil (Normalkraft)
3 Horizontaler Druckteil auf Rollen (Scherkraft)
4 Probebehälter
5 Distanzvorrichtung
6 Prüfring für die Normalkraft (Clockhouse, 10 t Druck)
7 Obere Platte mit Grobeinstellvorrichtung
8 Getriebe für die Regulierung der Normalkraft
9 Getriebekurbel für die Handeinstellung (Normalkraft)
10 Prüfring für die Scherkraft (Clockhouse, 5 t Druck und Zug)
11 Handkurbel zur Grobeinstellung
12 Elektrischer Antriebsmotor für die Aufbringung der Scherkraft
13 Getriebe zum Antriebsmotor zur Regulierung der Scherkraftgeschwindigkeit

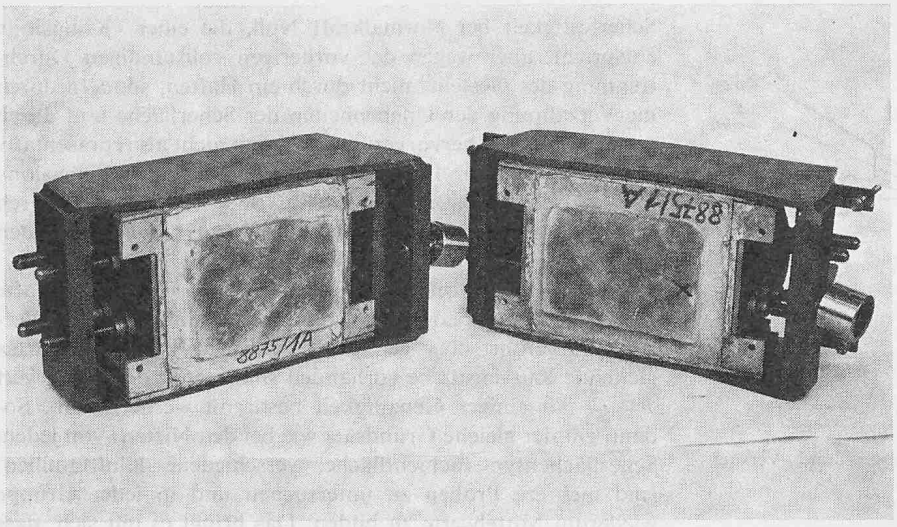


Bild 3. Ansicht der beiden Probenhälften vor dem Einbau

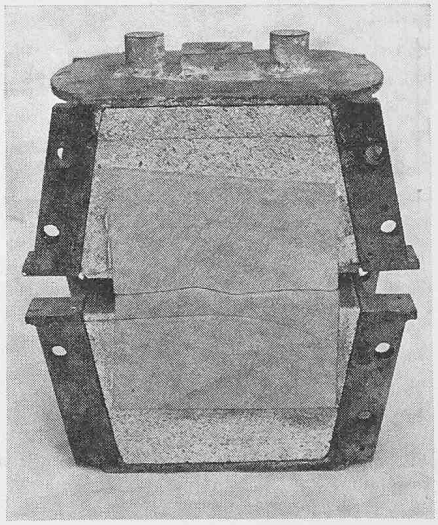


Bild 4. Durchgeschnittene Probe in Einbauposition

Zweck der Versuche

Die Scherfestigkeit von Fels längs einer Kluftfläche setzt sich aus folgenden zwei Anteilen zusammen:

a) Reibungswiderstand auf den Kluftflächen

b) Abscherwiderstand von Unebenheiten und Überzähnen.

Die im vorliegenden Aufsatz beschriebenen Versuche dienen dazu, den ersten Anteil zu bestimmen. Dieser ist vor allem bei den Problemen wichtig, bei denen durch technische Massnahmen (Vorspannanker, Tunnel mit nachfolgendem Gewölbeeinbau usw.) die Normalspannungen im Fels verändert werden. Die Kenntnis des Reibungskoeffizienten allein erlaubt in diesen Fällen schon, aus den Veränderungen in den Normalspannungen auf Veränderungen bei den Scherfestigkeiten längs den Kluftflächen zu schliessen. Da die Reibung von der Struktur der Oberfläche, also bei Fels von der Korn- oder Kristallgrösse der Felssubstanz abhängt, genügen für die Messung in den meisten Fällen Proben von 10 bis 20 cm Grösse. Die Versuche können daher im Laboratorium ausgeführt werden, was im Vergleich zu Feldversuchen geringere Kosten verursacht und eine grössere Anzahl von Versuchen unter wesentlich genauer kontrollierbaren Bedingungen auszuführen erlaubt.

Der zweite Anteil ist abhängig von der Materialfestigkeit des Felsens und von der Ebenheit der Kluftflächen. Da die Unebenheiten im Allgemeinen die Grössenordnung von Dezimetern aufweisen, müssen Versuche mit Proben von einem oder mehreren Metern ausgeführt werden, um auch diesen zweiten Anteil genau genug messen zu können.

Beschreibung des Geräts und der Versuchsdurchführung

Das für die Durchführung der Versuche verwendete Schergerät (Bild 1) stellt eine Weiterentwicklung des von Dr. *G. Lombardi,* Locarno, am 1. Internationalen Kongress für Felsmechanik in Lissabon, 1966 [1], beschriebenen Apparates dar. Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau des Gerätes. Es besteht aus einem horizontalen Rahmen, in welchem mit einem Elektromotor über ein mechanisches Getriebe die Scherkraft aufgebracht wird, und einem vertikalen Rahmen zur Erzeugung der Normalkraft auf die Probe. Die Probe selbst, ein durch eine Kluft- oder Schichtfläche in zwei Hälften geteiltes Felsstück (Bild 3), wird mit Zementmörtel so in zwei Stahlformen eingegossen, dass die Trennfläche in der ursprünglichen Lage aufeinander passt und ungefähr in der Symmetrieebene der Form liegt (Bild 4). Nach dem Einbau der Formen in den vertikalen Rahmen wird eine frei wählbare Normalkraft N auf die Probe aufgebracht und anschliessend über den horizontalen Rahmen eine langsame, mit konstanter Geschwindigkeit verlaufende Bewegung der Probenhälften gegeneinander erzwungen (Bild 5). Normal- und Schubkraft nimmt zuerst rasch zu, bis die Probenhälften aufeinander gleiten. Wird die Normalkraft konstant gehalten, so bleibt auch die Schubkraft vom Gleitbeginn an ungefähr konstant und kann als Punkt im Normalkraft-Schubkraft-Diagramm eingezeichnet werden. Die Erfahrung zeigt aber, dass die Versuche wesentlich leichter auszuwerten und aussagekräftiger sind, wenn wie folgt vorgegangen wird:

Nachdem eine Anfangsnormalkraft gewählt ist, wird das Normalkraft-Getriebe nicht mehr verändert, aber während des ganzen Versuchs beide sich verändernden Kräfte N und T registriert. Es entstehen dabei auf den N-T-Diagrammen charakteristische Kurven (Bild 6, oben), die von der gewählten Normalkraft (Punkt A) steil aufsteigen bis zum Beginn des Gleitens (B). Von da an wendet sich die Kurve nach links oder rechts, je nachdem, ob das Gleiten eine Vergrösserung oder Verkleinerung der Probenhöhe und damit der Normalkraft mit sich bringt (Skizzen a und b). Ist die Trennfläche nicht eben, sondern gebrochen (Skizze c), so bewegt sich der obere Probenteil zuerst auf der linken Probenhälfte abwärts, was den Kurventeil DE erzeugt, und nach Erreichen der tiefsten Lage auf der rechten Probenhälfte wieder aufwärts, wobei sich der Kurventeil FG ergibt. Ähnlich, aber mit mehrfachen Zyklen, erfolgt der Schervorgang bei einer gewellten Trennfläche.

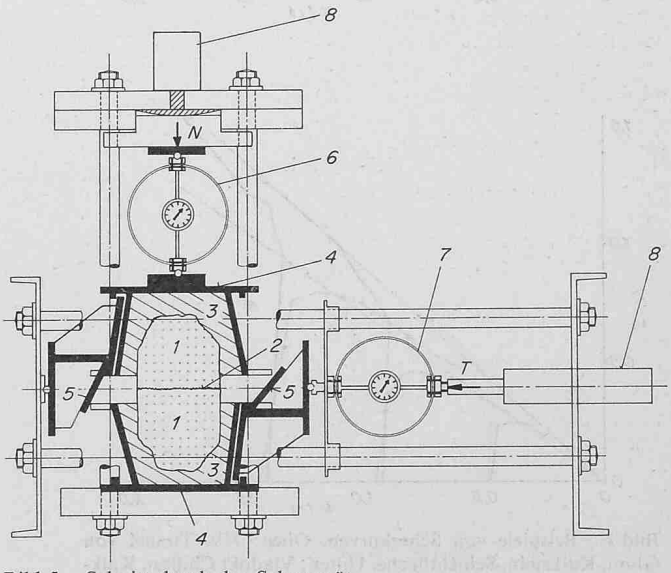


Bild 5. Schnitt durch das Schergerät

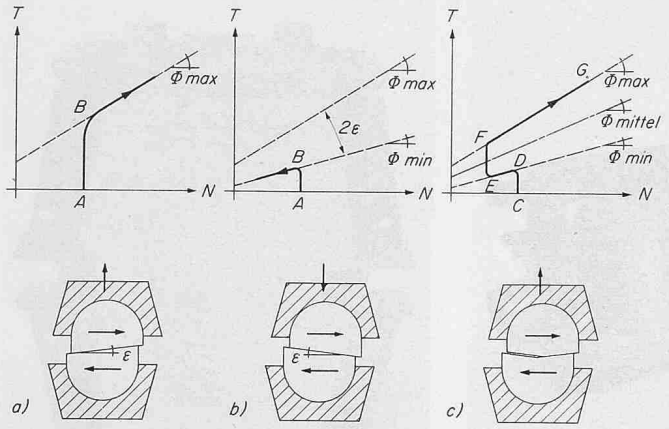


Bild 6. Schematische Darstellung der Bewegungen und Versuchsresultate

Punkte einer Scherkurve können daher auf zwei verschiedenen Scherlinien mit verschiedener Steigung Φ_{max} und Φ_{min} liegen. Eine einfache Analyse der Kräfte zeigt, dass der Unterschied

$$\Phi_{max} - \Phi_{min} = 2\,\varepsilon$$

dem doppelten Wert der Neigung der Trennfläche zur Horizontalen entspricht. Da auf einer Rutschfläche in der Natur die Wahrscheinlichkeit für Stellen, in denen Bewegungen mit abnehmender Höhe erfolgen, gleich gross ist wie für Bewegungen «aufwärts», kann als richtiger Wert für den Reibungswinkel der Mittelwert Φ_{mittel} zwischen Φ_{min} und Φ_{max} angenommen werden.

Wie schon im zweiten Abschnitt dargelegt, erlaubt der beschriebene Versuch in erster Linie die Bestimmung des Reibungswinkels Φ_{mittel}. Die durch Extrapolationen gefundene Scherfestigkeit bei Normalkraft Null, die einer «Kohäsion» entspricht, aber wegen der vorherigen vollständigen Durchtrennung des Gesteins nicht durch ein Haften, sondern durch die Verzahnung der Unebenheiten der Scherfläche und durch deren Abscheren hervorgerufen ist, kann nicht als repräsentativ betrachtet werden. Der richtige Wert für diese «Kohäsion» muss durch Grossversuche in-situ oder noch besser durch Stabilitätsüberlegungen an bestehenden Hängen gefunden werden.

An jedem Probekörper werden drei bis vier Normalkräfte gewählt, und von jedem Punkt aus in jeder Richtung ein Versuch ausgeführt, bis genügend «abwärts» und «aufwärts» gleitende Kurvenstücke vorhanden sind, damit der Mittelwert Φ_{mittel} mit einiger Genauigkeit bestimmt werden kann. Sodann gilt der gleiche Grundsatz wie bei den Nieten: von jedem Scherflächentyp (Schichtfläche, verschiedene Kluftfamilien) sind mehrere Proben zu untersuchen und in jeder Gruppe wiederum Mittelwerte zu bilden. Das bringt es mit sich, dass von einem Objekt im Allgemeinen 10 bis 15 Proben zu untersuchen sind.

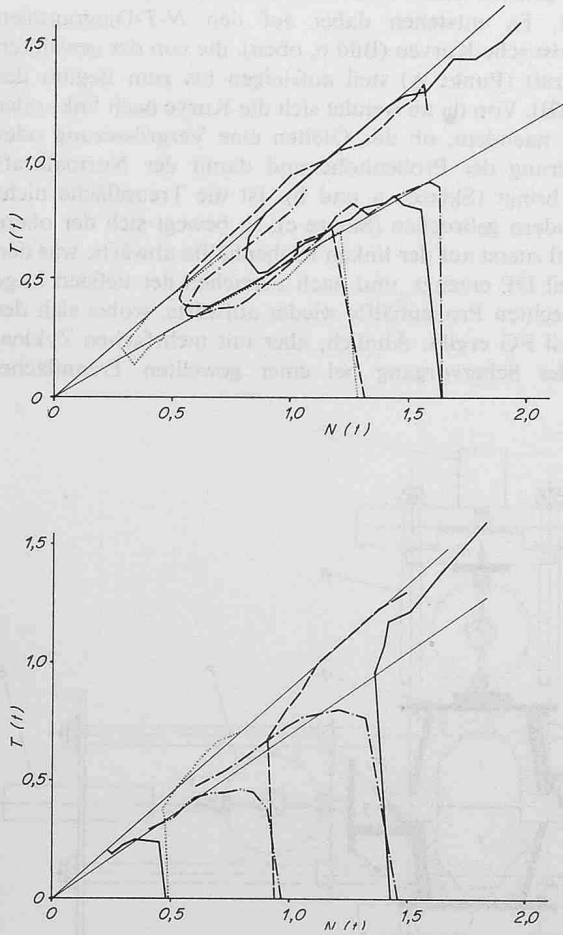


Bild 7. Beispiele von Scherkurven. Oben: N9, Tunnel von Glion, Kalkstein, Schichtfläche. Unten: Viadukt Chillon, Kalkschiefer aus dem Dogger, Schichtfläche

Einige Versuchsergebnisse

Bild 7 zeigt einige Ergebnisse von ausgeführten Versuchen. Wegen der Unebenheit der Kluftflächen sind die Kurven oft ziemlich unregelmässig. Zur Beurteilung müssen diejenigen Kurvenstücke herausgesucht werden, die den Gleitbewegungen «aufwärts» und «abwärts» entsprechen, um daraus einen mittleren Reibungswinkel zu ermitteln. Um statistisch einigermassen gesicherte Werte zu finden, sind beträchtliche Probenzahlen zu verarbeiten.

Tabelle 2 gibt eine Sammlung bisher geprüfter Felstypen mit Durchschnittszahlen für Φ_{mittel} wieder, die für erste Schätzungen eine Grundlage abgeben können. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Werten, die für Lockergesteine gefunden werden, so sieht man, dass der Fels sich vom entsprechenden Lockergestein vor allem in der Kohäsion der Felsmasse, aber nicht wesentlich im Reibungswinkel der Kluftflächen, unterscheidet.

Einzelne Versuche wurden mit Kluftfüllmassen, zum Beispiel Kluftlehm, ausgeführt (Versuche am Born [2]). Sind die Trennflächen eben genug, so ergeben sich in solchen Versuchen Werte für Φ_{mittel}, die sehr nahe bei den in Triaxialversuchen mit demselben Material gefundenen liegen. Es ist daher, sofern genügend Material vorhanden ist, ein Triaxialversuch an Kluftfüllmaterial vorzuziehen, da dabei insbesondere die Porenwasserspannungen besser kontrolliert werden können.

Eine praktische Schwierigkeit bei der Ausführung von Scherversuchen ist das Auffinden und Entnehmen von geeigneten Proben, das heisst von zwei Steinstücken, die ein gemeinsames Stück Kluftfläche enthalten und sich in Form und Grösse für die Versuche eignen. Will dies nicht gelingen, so werden saubere Kluftflächen oft durch Trennschnitte mit der Diamantsäge nachgeahmt. Die dabei erhaltenen Ergebnisse dürfen natürlich nur als angenäherte Richtwerte verwendet werden.

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt eine Apparatur und die Versuchstechnik, mit welcher die Scherfestigkeitseigenschaften von Kluftflächen in Fels, insbesondere der Reibungsanteil, untersucht werden können. Die Festigkeitsverhältnisse längs Klüften sind unter der grossen Zahl von Parametern wohl diejenigen, die das Stabilitätsverhalten von Fels am stärksten beeinflussen. Das Reibungsverhalten ist vor allem bei allen technischen Problemen ausschlaggebend, bei denen durch Massnahmen, wie Ausbruch und Ankerung, die Normalspannungen im Fels verändert werden. Mit Hilfe des Reibungs-

Tabelle 2. Felsscherversuch an Kluftflächen. Zusammenstellung bisher gefundener Ergebnisse

Herkunft	Felsart	Art der Trennfläche	Anzahl Proben	Mittlerer Reibungswinkel Φ_{Mittel}
Born N1	Malmkalk, saubere Flächen	Klüfte	1	45°
		Schichtflächen	3	46°
	Malmkalk, Flächen mit Kluftlehm	Klüfte	1	37°
		Schichtflächen	3	43°
Clusette, Val de Travers	Jurakalk, Fläche mit Kalzit-Belag	Schichtflächen	4	38°
	Jurakalk, Fläche mit Eisenhydroxydbelag	Schichtflächen	1	32°
Zentrale Veytaux	Jurakalk der ostalpinen Klippen	Klüfte	10	31°
Viaduc de Chillon, N9	Mergeliger Jurakalk (ostalpine Klippen)	Klüfte	4	35°
	Kalkschiefer	Schichtflächen	4	33°
	Tonschiefer	Schichtflächen	6	20°
Burgdorf, Schlossfels	Tertiärer Sandstein	Klüfte	8	34°
	Tertiärer Siltstein	Klüfte	2	29°
Central, Zürich	Tertiärer Sandstein	Schichtflächen	2	40°
	Tertiärer Siltstein	Schichtflächen	4	38°
	Tertiärer Siltstein, stark mergelig	Schichtflächen	3	30°
	Mergel	Schichtflächen	2	20°
Tunnel de Criblette, N9	Tertiärer mergeliger Sandstein	Schichtflächen	4	34°
Tunnel de Flonzaley, N9	Tertiärer mergeliger Sandstein ohne Kluftlehm	Schichtflächen	7	28°
		Klüfte	11	30°
	Tertiärer mergeliger Sandstein mit Kluftlehm	Klüfte	3	23°
Clarens, N9	Tertiärer Mergel	Schichtflächen	4	28°
Contra Damm (Versuche ausgeführt von Dr. G. Lombardi [1])	Gneis	Schichtfläche		33°
		Scherfläche		38°
		Klüfte		42°
	Kalksilikatfels	Schichtfläche	41	48°
		Scherfläche		40°
		Klüfte		47°
	Quarzit	Klüfte		41°

winkels lässt sich der Einfluss einer solchen Normalspannungsveränderung auf die Scherfestigkeit voraussagen. Damit kann der Einfluss eines geplanten Eingriffs, zum Beispiel in eine Felsböschung, auf die Sicherheit abgeschätzt werden. Neben einer Beschreibung des Scherapparats und der Versuchsdurchführung gibt der Artikel eine Zusammenstellung von bisher ausgeführten Versuchen wieder. Die Sammlung kann, so unvollständig sie ist, als Grundlage für Annahmen und Schätzungen in Fällen dienen, wo keine Versuche durchgeführt werden können.

Adresse des Verfassers: *H.G. Locher*, dipl. Ing. ETH in Firma Losinger AG, 3001 Bern, Könizstrasse 74, Postfach 2676.

Literaturverzeichnis

[1] *Lombardi, G.*: Die experimentelle Bestimmung der Reibungskoeffizienten für die Felswiderlager der Staumauer Contra (Verzasca). Proc. 1st. Congress of the Int. Soc. of Rock Mechanics, 1966.
[2] *Rieder, U.*: Felsscherversuche am Born. SBZ 1971, H. 30, S. 756–759.
[3] *Locher, H.G.*: Some Results of Direct Shear Tests on Rock Discontinuities. Int. Symposium on Rock Mechanics. Madrid 1968, II – 6.
[4] *Londe, P.*: La résistance au cisaillement des roches. Proceedings of the Geotechnical Conference. Oslo 1967, Vol. 2.
[5] *Bernaix, J.*: La mesure de la résistance des roches. Proceedings of the Geotechnical Conference. Oslo 1967, Vol. 1.
[6] *Evdokimov, P.D., Gouréev, A.M.* und *Mognilevskaya, S.E.*: Résistance au cisaillement selon les fissures dans les fondations rocheuses des ouvrages hydrauliques. Proceedings of the Second Congress of the International Society of Rock Mechanics. Belgrade 1970, Vol. II, 3–18.
[7] *Baldovin, G.*: The Shear Strength of Some Rocks by Laboratory Tests. Proceedings of the Second Congress of the International Society of Rock Mechanics. Belgrade 1970, Vol. II, 3–24.
[8] *Kazimierz, Th.*: Etude de la résistance au cisaillement d'un massif calcaire stratifié et fracturé. Proceedings of the Second Congress of the International Society of Rock Mechanics. Belgrade 1970, Vol. II, 3–27.

Die Erweiterungsbauten des Waffenplatzes Bülach

DK 725.18

Am 14. Mai 1971 übergab das eidgenössische Militärdepartement im Rahmen einer schlichten Feier der Abteilung für Übermittlungstruppen die beiden neuerstellten, modernen Gebäude auf dem Waffenplatz Bülach. Es handelt sich dabei um einen dreigeschossigen, unterkellerten Mannschaftstrakt für die Unterbringung zweier Kompagnien mit allen erforderlichen Schlafräumen, Büros, Magazinen, Lokalitäten für die Verpflegung, Arrestzellen und sanitären Erfordernissen, sowie um ein zweigeschossiges Lehrgebäude mit Unterrichts- und verschiedenartigen Arbeitsräumen, Offiziersunterkünften und Luftschutzkellern. Den Antrag zur Planung dieser dringenden Waffenplatzerweiterung erteilte das EMD der Direktion der eidg. Bauten im Herbst 1964, und drei Jahre später bewilligte das Parlament den erforderlichen Kredit von insgesamt 10,14 Mio Fr. für Bauten und Mobiliar. Für die Projektierung und Ausführung trugen die Architekten SIA *H. Knecht & K. Habegger*, Bülach, die Verantwortung.

Ursprünglich waren Gebäude aus vorfabrizierten Elementen geplant gewesen, doch die vielseitigen technischen Ansprüche des Projektes liess das in der Folge nicht zu, so dass sich das System der Vorfabrikation auf die Verkleidung der Aussenwände und die Putzstände im Freien beschränken musste. Die Absicht hingegen, mit möglichst wenig Grundfläche für die Hochbauten auszukommen, die Unterhaltserfordernisse auf ein Minimum zu beschränken sowie den Gebäuden und ihren Räumen eine gefällige Form und psychisch angenehme Atmosphäre zu verleihen, wurde voll und ganz erreicht. Es ist auch erfreulich zu hören, dass der Kredit eingehalten werden kann.

Das Lehrgebäude enthält eine sogenannte permanente