



# Direkte Scherversuche an kohäsionslosen Felsklüften unter gefrorenen und ungefrorenen Bedingungen – Versuchsaufbau, Datenauswertung und Implikationen für das Prozessverständnis

Direct shear tests on cohesionless rock joints under frozen and unfrozen conditions - experimental setup, data analysis and implications for process understanding

Daniel Funk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipl. Geograph Daniel Funk, Geographisches Institut, Universität Bonn, danielfunk@giub.uni-bonn.de

## Zusammenfassung

Der Zusammenhang zwischen Permafrostdegradation und Felsinstabilität erfordert eine auf physikalischen Prozessen basierende Begründung. Die Annahme ist, dass Frost eine signifikante Auswirkung auf felsmechanische Prozesse hat. Mithilfe direkter Scherversuche an gefrorenen und ungefrorenen Klüftflächen wird hier versucht die Hypothese zu testen, dass „Die Reibung eine Kluft unter gefrorenen Bedingungen größer ist als unter ungefrorenen Bedingungen“. Während die Testergebnisse statistisch diese Hypothese noch nicht eindeutig verifizieren können, machen diese vor dem Hintergrund des Prozessverständnisses der Reibung gefrorener und ungefrorener Klüfte durchaus Sinn. Neben einem Prozessmodell der Reibung gefrorener und ungefrorener Klüfte wird ein optimiertes Probendesign für weiterführende Scherversuche entwickelt.

**Schlüsselworte:** Permafrost, Fels-Eismechanik, direkte Scherversuche, Versuchsdesign

## Abstract

An increasing number of rock slope failures were recorded in recent years which could be allocated to the degradation of permafrost in rock walls. The physical processes linking permafrost degradation and rock slope failures are still not known. It is considered that rock mechanical processes may be important since the fact that fracture toughness, compressive and tensile strength decrease by up to 50 % and more when intact water-saturated rock thaws. Considering the failure criterion for shear failure of separated rock-blocks from BARTON & CHOUBEY (1977), we suggest a reduction of shear strength of thawing permafrost rocks due to diminishing friction. This hypothesis is tested by some direct shear tests on discrete rock samples (Wetterstein limestone) and frozen and unfrozen conditions. The test data shows that shear strength of rock joints systematically increases when frozen at least for some test conditions. Based on this preliminary data and the evaluation of the failure criterion for shear failure a conceptual process model is developed: We assume that the reduced friction for thawed samples is due to the shearing of asperities which is a statistical consequence of reduced uniaxial compressive and tensile strength of asperities. The significance of the reduced shear strength effect due to thawing is dependent on temperature, porosity and the relation of initial roughness and applied normal load. This model is used to develop an optimized sample design for further tests and an quantitative verification of the hypothesis.

**Keywords:** permafrost, rock-ice mechanics, direct shear tests, test design

## 1 Einleitung

Die klimatisch bedingte Degradation von Permafrost in steilen Felshängen wird zunehmend als Ursache für eine verstärkte Destabilisierung von Felshängen in Permafrostbereichen angesehen (FISCHER et al., 2010; FISCHER & HUGGEL, 2008). Daraus resultierende beschleunigten Hangdeformationen und erhöhten Steinschlagaktivitäten stellen somit ein verstärktes Gefährdungspotential für Infrastruktur und Menschenleben dar (BROMMER et al., 2009; MESSERLI, 2006). Der Zusammenhang zwischen Permafrostdegradation und Felsinstabilität basiert in der Literatur auf drei induktiven Argumenten:

- Eis im Anrissbereich von Felsstürzen (DRAMIS et al., 1995; GRUBER AND HAEBERLI, 2007; HAEBERLI et al., 2004).

- Räumliche Korrelationen von Permafrostdegradation und Felsstürzen (ALLEN et al., 2009; NOETZLI et al., 2003).
- Zeitlichen Korrelationen von Temperaturanomalien und Felsstürzen (FISCHER et al., 2006; GRUBER et al., 2004; HUGGEL, 2009; RABATEL et al., 2008).

KRAUTBLATTER ET AL. (in press) verfolgen einen deduktiv systemischen Ansatz, welcher Permafrostdegradation und Felsinstabilität basierend auf physikalischen Prozessen begründet. Dieser Ansatz mündet in einem fels-eismechanischen Modell, welches bestehende mechanische Konzepte aus Glaziologie und Ingenieurgeologie vereinigt und deren räumlichen und zeitlichen Signifikanz gewichtet. Kern dieses Modells ist die Tatsache, dass felsmechanische Parameter wie uniaxiale Druckfestigkeit und Zugfestigkeit,

sowie die Bruchzähigkeit von wasser-gesättigtes gefrorenem Gestein um bis zu 50 % und mehr abnehmen, wenn dieses taut (DAHLSTRÖM, 1992; DWIVEDI ET AL., 1998; LI ET AL., 2003; MELLOR, 1973). Dies hat Auswirkungen auf felsmechanische Prozesse wie der spröden Bruchpropagation in Felsbrücken und der Reibung an Klufflächen, welche bisher noch nicht untersucht wurden:

Die Spitzenscherfestigkeit ( $\tau_p$ ) entlang einer kohäsionslosen Kluft kann nach BARTON UND CHOUBEY (1977) wie folgt quantifiziert werden:

$$\tau_p = \sigma' * \tan(JRC * \log_{10} \left[ \frac{\sigma_u}{\sigma_r} \right] + \phi_r) \quad (1)$$

mit der effektiven Normalspannung  $\sigma'$ , dem Kluftrauhigkeitskoeffizienten  $JRC$ , der Kluftwanddruckfestigkeit  $\sigma_u$  und der Restscherfestigkeit  $\phi_r$ . Einer deduktiven Argumentation folgend, müsste die Erhöhung der uniaxialen Druckfestigkeit ( $\sigma_u$  in Gleichung 1) unter gefrorenen Bedingungen zu einer Erhöhung der Spitzenscherfestigkeit führen. Dieser Effekt sollte mit zunehmender Rauigkeit stärker ausfallen (KRAUTBLATTER ET AL., IN PRESS).

Dieser deduktive Schluss generiert eine Hypothese, welche empirisch getestet werden muss:

*„Die Reibung eine Kluft unter gefrorenen Bedingungen ist größer als unter ungefrorenen Bedingungen.“*

Dieser Test erfolgt über direkte Scherversuche an Festgesteinsproben im Labor unter gefrorenen und ungefrorenen Bedingungen im Vergleich. Die Aussagekraft eines solchen Laborexperimentes ist abhängig von dem Versuchs- und Probedesign, welche immer ein Kompromiss aus Prozessverständnis und technischen Rahmenbedingungen ist.

In diesem Paper werden die Laborexperimente zu den direkten Scherversuchen aus KRAUTBLATTER ET AL. (in press) aufgegriffen und das Systemverständnis welches dem Versuchsdesign zugrunde liegt analysiert. Basierend auf den vorläufigen Ergebnissen wird ein Prozessmodell entwickelt, welches helfen soll ein der Hypothese angemessenes Versuchs- und Sampledesign zu konstruieren.

## 2 Direkte Scherversuche

### 2.1 Probedesign

Für die Proben wurden zwei Lithologien (Wettersteinkalk [D], Wettersteindolomit [L]) aus der Zugspitzregion (Deutschland) verwendet. Aus den Handstücken wurden insgesamt drei Paar rechteckige Blöcke mit einer Scherfläche von 35\*35 mm und einer Mächtigkeit von 20 mm gesägt und glatt geschliffen (Abb. 1a). Die Rauigkeit wurde mit Hilfe eines Schleifpapiers mit einer P24 Körnung ( $\varnothing$  764  $\mu$ m) in eine Richtung auf die Scherfläche aufgetragen, so dass ein unregelmäßiges Sägezahnmuster mit einer Amplitude und Frequenz von max. der Körnung des Schleifpapiers generiert wird (Abb. 1b). Nach dem Schleifen wurden die Proben in einem Ultraschallbad von Feinpartikeln gesäubert.

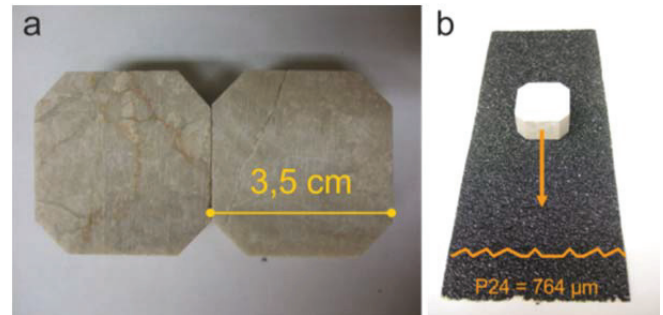


Abb. 1: a) Probedesign für direkten Scherversuch (Wettersteinkalk); b) Methode der Rauigkeitsgenerierung (P24 Schleifpapier).

Fig. 1: a) Sample design for direct shear test (wetterstein limestone); b) Method of roughness generation (P24 abrasive paper).

### 2.2 Versuchsdesign

Für die Scherversuche wurde ein Bodenscherggerät verwendet mit einer maximalen Zugkraft von 5 kN und modifiziertem Scherrahmen für Festgesteinsproben (Abb. 2a). Das Scherggerät befindet sich in einer thermisch isolierten Kühlbox, welche mithilfe einer Kühlplatte, einem Zwangskühler und einem Hochleistungsventilationssystem auf eine Lufttemperatur von  $< -10^{\circ}\text{C}$  runtergekühlt werden kann. Luft- und Probenoberflächentemperatur wurden während den Scherversuchen mit Pt100-Sensoren aufgezeichnet (Abb. 2b).

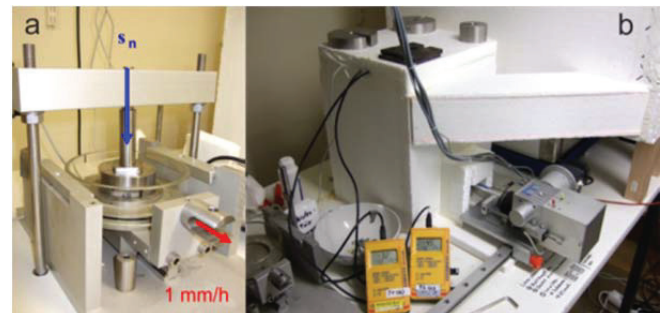


Abb. 2: a) Bodenscherggerät mit modifiziertem Scherrahmen; b) Kühlbox mit integriertem Scherggerät und T-Sensoren.

Fig. 2: a) Shear device with modified shear frame; b) Freezing box with integrated shear device and T-sensors.

Insgesamt wurden fünf Testreihen (D1, L1-L4) mit Probenpärchen aus zwei ähnlichen Lithologien durchgeführt. In jeder Testreihe wurde das Probenpärchen bei gegebener Normalspannung unter gefrorenen und ungefrorenen Bedingungen geschert. Für jeden Scherversuch wurden die Proben vorher auf die Standardrauigkeit gebracht, im Ultraschallbad gesäubert und mind. 36 h gesättigt (atmosphärische Sättigung). Der Scherversuch wurde bei einem konstanten Versatz von 1 mm/h durchgeführt und nach einem Scherversatz von mind. 6 mm gestoppt. Die gefrorenen Versuche wurden bei einer Probenoberflächentemperatur von  $-4,5 (\pm 0,5) ^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Um die Bildung von Eis auf der Scherfläche zu vermeiden wurde Trockenmittel (Orange Gel) verwendet. In jeder Testreihe wurden 6 – 9 Scherversuche mit Normalspannungen zwischen 74 und 1333 kPa durchgeführt.



### 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der direkten Scherversuche von fünf Testreihen (D1, L1-L4) sind in Abb. 3a-e als Scherspannungs - Scherversatzdiagramme dargestellt.

Bei alle fünf Testreihen ist der Reibungswinkel ( $\varphi$ ) der gefrorenen Versuche größer als der der ungefrorenen Versuche. Die Differenz der Reibungswinkel von gefrorenen und ungefrorenen Versuchen ( $\Delta\varphi$ ) beträgt für Probe D1  $4,4^\circ$ , für Probe L1  $4,6^\circ$ , für Probe L2  $6,4^\circ$  und für Probe L3 und L4  $1,6^\circ$  und  $0,7^\circ$  entsprechend. Es ist bemerkenswert, dass bei alle fünf Testreihen der Unterschied zwischen gefroren und ungefrorenen Versuchen bei relativ geringen Normalspannungen (bis ca. 400-600 kPa) kaum vorhanden ist. Eine Zunahme der Scherfestigkeit aufgrund des Frierens ist generell erst ab einer Normalspannung von  $\sim 500/600$  kPa zu beobachten. Die Zunahme beträgt in diesem Bereich 14 – 17 % der ungefrorenen Scherfestigkeit.

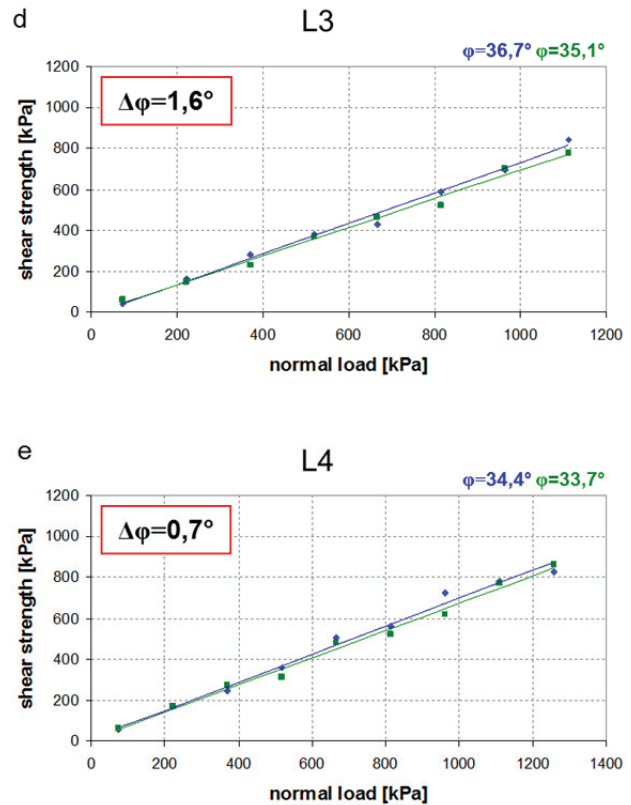
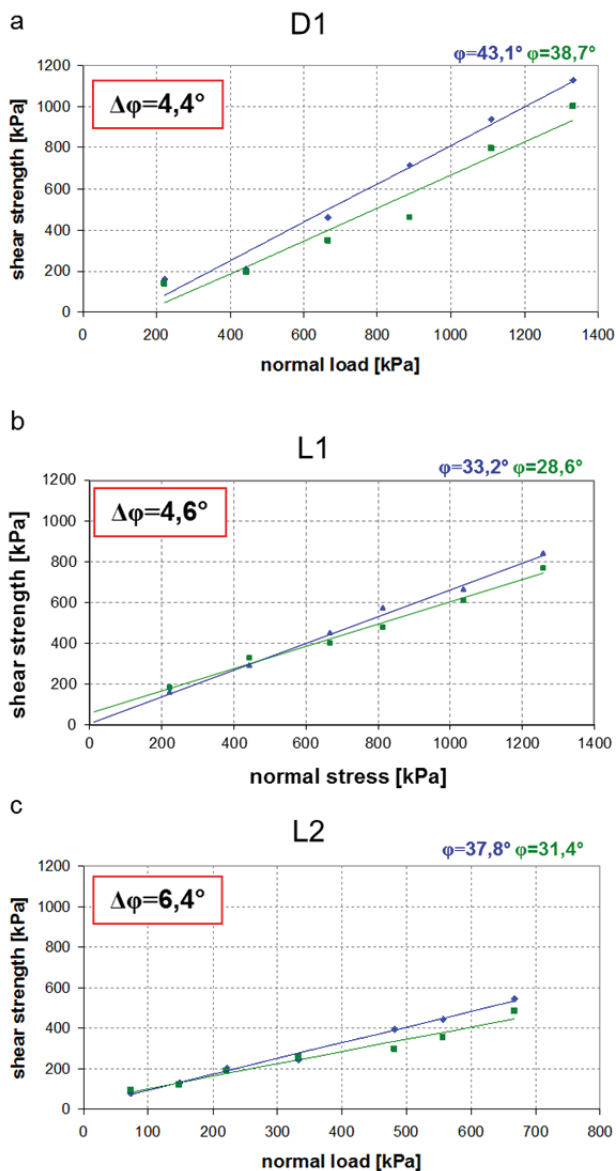


Abb. 3: a-e) Scherspannungs-Scherversatzdiagramme für die Testreihen D1 (a) und L1-L4 (b-e). Grünen Quadrate = ungefrorenen Versuche; blaue Dreiecke = gefrorenen Versuche.

Fig. 3: a) Shear strength-shear displacement diagrams for the test series D1 (a) and L1-L4 (b-e). Green squares = unfrozen tests; blue triangles = frozen tests.

### 4 Diskussion

Alle Testreihen zeigen einen höheren Reibungswinkel bei gefrorenen Proben als bei ungefrorenen Proben. Auch wenn diese Differenzen nicht besonders groß sind, zeigen sich diese als sehr konsistent bei Normalspannungen größer 500 kPa und durch alle Testreihen. Die statistische Signifikanz dieser Unterschiede (trotz geringer Stückzahl) muss allerdings kritisch diskutiert werden. Die lithologischen Heterogenität bewirkt bei den Proben L1-L4 eine Standardabweichung von  $2,1^\circ$  (gefroren) bzw.  $2,8^\circ$  (ungefroren).  $\Delta\varphi$  von L3 und L4 fallen in diesen Bereich und sind deshalb als nicht signifikant zu bewerten. Und auch L1 und D1 (unter der Voraussetzung dass bei D1 eine ähnliche Varianz auftreten würde) wären kritisch zu betrachten. Muss die Hypothese deshalb, aufgrund der vorhandenen Datenlage zurückgewiesen werden?

Eine weitere grundsätzlich wichtige Möglichkeit die Daten auf deren Aussagekraft prüfen zu können, ist eine Diskussion des Systemverständnisses, welches dem Versuchs- und Probendesign zugrunde liegt vor dem Hintergrund des Systemverständnisses, welches der Hypothese zugrunde liegt.

#### 4.1 Reibung gefrorener Klüfte: Systemverständnis

Der Versagensmechanismus von Klüften ist immer eine Mischung aus Dilatation und dem Abscheren von Unebenheiten (BARTON AND CHOUBEY, 1977). Der Anteil des Abscherens von Unebenheiten nimmt zu, wenn das Verhältnis der uniaxialen Druckfestigkeit der Klüftoberfläche zu der Normalspannung abnimmt. Diese Abnahme kann durch das Auftauen von Fels sehr plötzlich und in einem beträchtlichen Maße (50 %) passieren (MELLOR, 1973). Eine Abnahme der Scherfestigkeit von gefrorenen Felsklüften durch Tauen kann folglich nur durch den verstärkten Bruch von Unebenheiten bedingt werden.

Der Effekt der Festigkeitszunahme von Festgestein unter gefrorenen Bedingungen wird bedingt durch die Versiegelung von Mikrorissen, Poren und anderen Inhomogenitäten durch Eis (GLAMHEDEN, 2001; INADA AND YOKOTA, 1984). Eine Abnahme der Scherfestigkeit von gefrorenen Felsklüften durch Tauen wird nur von Bedeutung sein, wenn das Gestein ausreichend Porös und wassergesättigt ist, so dass eine Festigkeitsabnahme der abzuscherenden Unebenheiten gegeben ist.

Der Effekt der Reibungsreduzierung durch Tauen ist folglich stark abhängig von  $\sigma_n/\sigma'_c$ . Ist die effektive Normalspannung sehr viel kleiner als die ungefrorene uniaxiale Druckfestigkeit, wird der Prozess des Taus dieses Verhältnis nicht weit genug verringern, so dass unter gefrorenen und ungefrorenen Bedingungen der Versagensmechanismus durch Dilatation stattfinden wird. Ist die effektive Normalspannung jedoch sehr viel größer als die gefrorene uniaxiale Druckfestigkeit, so werden die Unebenheiten unabhängig davon ob sie gefroren sind oder nicht, vor allem abgeschert werden. Das bedeutet, dass es nur ein spezifisches Fenster von  $\sigma_n/\sigma'_c$ -Beziehungen geben kann, in dem der Effekt der Reibungsreduzierung durch Tauen signifikant sein kann.

#### 4.2 Systemverständnis des Probendesigns

Das hier verwendete Probendesign ist charakterisiert durch kleine Probenmaße (35\*35 mm) und einer sehr geringe Rauigkeit (JRC=0), welche mit Schleifpapier aufgebracht wurde. Dieses Design orientiert sich in erster Linie an den technischen Limitierungen der Geräte, sowie der absoluten Fokussierung auf die Wiederholbarkeit der Versuche: Die Probengröße wurde durch den Scherrahmen vorgegeben und auch den Grad der Rauigkeit ist limitiert durch die max. Zugkraft des Schergerätes (5 kN). Die Methode der Rauigkeitsgenerierung per Schleifpapier ist einfach und schnell und ermöglicht die Wiederverwendung der gleichen Probe für eine gesamte Testreihe. Das ist sehr vorteilhaft, da die Inhomogenität der Lithologie immens reduziert wird und ein direkter Vergleich von gefrorenen und ungefrorenen Scherfestigkeiten möglich ist.

Das implizite Systemverständnis hingegen ist sehr limitiert hinsichtlich des zu erwartenden Prozessablaufes. Das in diesem Versuch verwendete Probendesign ist in Abb. 4 schematisch dargestellt:

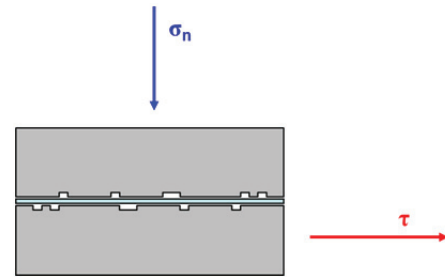


Abb. 4: Schematisches Probendesign mit geringer Rauigkeit und potentieller Eisschicht. Mit  $\sigma_n$ =Normalspannung und  $\tau$ =Scherspannung.

Fig. 4: Schematic Sample design with little roughness and potential ice layer. With  $\sigma_n$ =normal stress and  $\tau$ =shear stress

Das Aufbringen von Rauigkeit durch Schleifpapier generiert wohl eher Furchen als Unebenheiten, welche sich aktiv ineinander verzahnen können und zu Dilatation und Bruch dieser führen. Des Weiteren ist die Magnitude der Unebenheiten so gering, dass die Masse die beim Scheren brechen kann und somit den Unterschied zwischen gefrorener und ungefrorener Scherfestigkeit ausmacht, sehr gering. Ein deutlicher Unterschied kann also mit diesem Probendesign nicht erwartet werden. Die Bildung einer potentiellen Eisschicht (welche in diesem Versuch zwar unterdrückt wurde, aber nicht garantiert verhindert werden konnte), würde bei diesen geringen Rauigkeitsprofil dieses schneller in seiner Wirkung auf die Scherfestigkeit reduzieren oder gar umkehren. Dies könnte auch eine Erklärung für einzelne Scherversuche sein, vor allem bei geringen Normalspannungen, bei denen die ungefrorene Scherfestigkeit größer ist als die gefrorene.

Ein weiterer limitierender Faktor ist das Verhältnis von Korngrößen zur Magnitude der Unebenheiten (siehe Abb. 5): Die kleine Magnitude der Unebenheiten exponiert dem Scherprozess nur sehr wenig Masse, welche potentiell abgeschert werden kann. Ist diese Masse geringer als die Korngröße des Probenmaterials sind vermutlich nur sehr wenig oder gar keine Schwachstellen (Poren, Mikrokluften, etc.) am Scherprozess beteiligt, so dass der Effekt des Frierens auf die Festigkeitszunahme der Unebenheiten nur sehr gering ist.

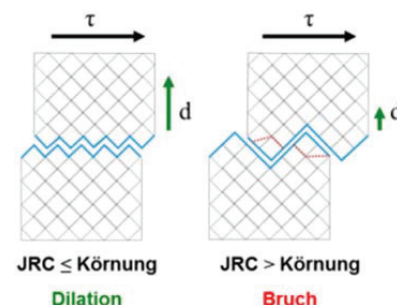


Abb. 5: Auswirkung des Körnungs-Rauigkeitsverhältnisses auf den Scherprozess und die Wirkung des Frierens. Mit  $d$ =dilatation;  $\tau$ =Scherspannung und  $JRC$ =Kluftrauigkeitskoeffizient.

Fig. 5: Effect of the relation of particle size and roughness on the shearing process and the result of freezing. With  $d$ =dilatation;  $\tau$ =shear stress and  $JRC$ =joint roughness coefficient



### 4.3 Implikationen für das Probendesign

Das Probendesign, welches sich aus der obigen Diskussion ableitet unterliegt den folgenden systemischen Hypothesen:

- Eine Abnahme der Scherfestigkeit von gefrorenen Felsklüften durch Tauen beruht auf einem verstärkten bruchverhalten der Unebenheiten.
- Die Anfälligkeit der Unebenheiten beim Scherprozess zu brechen ist abhängig von der Anzahl der austauenden Mikrokluft die dem Scherprozess ausgesetzt werden.

Folglich müsste der Effekt der verminderten Scherfestigkeit von gefrorenen Felsklüften durch Tauen für Proben mit einer hohen Porosität, hohem Sättigungsgrad und hoher Rauigkeit am größten sein.

Diese Anforderungen an das Probendesign bringen einige technische Herausforderungen mit sich: (i) hohe Porosität führt zu einer erhöhten Materialinhomogenität. (ii) eine hohe Rauigkeit limitiert die mehrfache Nutzung des gleichen Samples. Beide Faktoren erhöhen das Rauschen und machen Versuche in großer Stückzahl und eine statistische Auswertung notwendig, was sehr aufwendig ist.

Weiter wird für jede Lithologie ein anderes Verhältnis von  $\sigma_u$  zu  $\sigma'_c$  bei gleicher effektiver Normalspannung vorliegen. D.h., dass für jeder neuen Lithologie das spezifische  $\sigma_u/\sigma'_c$ -Fenster gefunden werden muss, indem der Effekt der Reibungsreduzierung durch Tauen signifikant ist.

### 5 Fazit

Die vorliegenden ersten Daten zur Scherfestigkeit gefrorenen Felsklüfte können die Hypothese der Reibungsreduzierung gefrorener Klüfte durch Tauen noch nicht signifikant verifizieren. Eine systemische Analyse des Reibungsprozesses gefrorener Felsklüfte macht jedoch deutlich, dass ein optimiertes Probendesign durchaus diese Hypothese verifizieren kann. Das verwendete Probendesign kann also zu keiner vollständigen Verifizierung der Hypothese führen, da die Randbedingungen nicht ausreichend gut gewählt wurden. Diese theoretischen Überlegungen zum Reibungsprozess unterstützen jedoch die vorliegenden Messergebnisse in ihrer Magnitude. Diese sind deshalb als guter erster Indikator dafür, dass Gleichung 1 ein adäquates Modell zur mechanischen Beschreibung tauender Felsklüfte ist.

### Literatur

- ALLEN, S.K., GRUBER, S., AND OWENS, I.F., 2009, Exploring Steep Bedrock Permafrost and its Relationship with Recent Slope Failures in the Southern Alps of New Zealand: *Permafrost and Perigl. Process.*, v. 20, p. 345-356.
- BARTON, N., AND CHOUBEY, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice: *Rock Mechanics*, v. 10, p. 1-54.
- BROMMER, C., PHILLIPS, M., KEUSEN, H.-R., AND TEYSSEIRE, P., 2009, Bauen im Permafrost; Ein Leitfaden für die Praxis: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- DAHLSTRÖM, L.-O., 1992, Rock Mechanical Consequences of Refrigeration: Göteborg, Chalmers University of Technology.
- DRAMIS, F., GOVI, M., GUGLIELMIN, M., AND MORTARA, G., 1995, Mountain Permafrost and Slope Instability in the Italian Alps: the Val Pola Landslide: *Permafrost and Perigl. Process.*, v. 6, p. 73-82.
- DWIVEDI, R.D., SINGH, P.K., SINGH, T.N., AND SINGH, D.P., 1998, Compressive strength and tensile strength of rocks at sub-zero temperature: *Indian J. Eng. Mat. Sc.*, v. 5, p. 43-48.
- FISCHER, L., AMANN, F., MOORE, J.R., AND HUGGEL, C., 2010, Assessment of periglacial slope stability for the 1988 Tschierwa rock avalanche (Piz Morteratsch, Switzerland): *Engineering Geology*, v. 116, p. 32-43.
- FISCHER, L., AND HUGGEL, C., 2008, Methodical Design for Stability Assessments of Permafrost-Affected High-Mountain Rock Walls, in Kane, D.L., and Hinkel, K.M., eds., 9th Int. Conf. on Permafrost, Volume 1: Fairbanks, Alaska, US, INE-UAF, p. 439-444.
- FISCHER, L., KÄÄB, A., HUGGEL, C., AND NOETZLI, J., 2006, Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 6, p. 761-772.
- GLAMHEDEN, R., 2001, Thermo-Mechanical Behaviour of Refrigerated Caverns in Hard Rock: Göteborg, Chalmers University of Technology.
- GRUBER, S., AND HAEBERLI, W., 2007, Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change: *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, v. 112, p. F02S13.
- GRUBER, S., HOELZLE, M., AND HAEBERLI, W., 2004, Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003: *Geophys. Res. Lett.*, v. 31, p. L15054.
- HAEBERLI, W., HUGGEL, C., KÄÄB, A., ZGRAGGEN-OSWALD, S., POLKVOJ, A., GALUSHKIN, I., ZOTIKOV, I., AND OSOKIN, N., 2004, The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus: *Journal of Glaciology*, v. 50, p. 533-546.
- HUGGEL, C., 2009, Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation: *Quaternary Science Reviews*, v. 28, p. 1119-1130.
- INADA, Y., AND YOKOTA, K., 1984, Some Studies of Low-Temperature Rock Strength: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 21, p. 145-153.
- KRAUTBLATTER, M., FUNK, D., AND GÜNZEL, F., in press, Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space: *Earth Surf. Process. Landforms*.
- LI, N., ZHANG, P., CHEN, Y., AND SWOBODA, G., 2003, Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading: *Int. J. Rock Mech. & Mining Sciences*, v. 40, p. 145-150.
- MELLOR, M., 1973, Mechanical Properties of Rocks at Low Temperatures, 2nd Int. Conference on Permafrost: Yakutsk, Russia, p. 334-344.
- MESSERLI, B., 2006, From nature-dominated to human-dominated global environmental change in the mountains of the world,

*in* Price, M.F., ed., Global Change in Mountain Regions: Duncow, Sapiens Publishing, p. 3-5.

NOETZLI, J., HOELZLE, M., AND HAEBERLI, W., 2003, Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: a GIS-based approach to determine critical factors, *in* Phillips, M.,

Springman, S., and Arenson, L., eds., 8th International Conference on Permafrost: Zurich, Swets & Zeitlinger.

RABATEL, A., DELINE, P., JAILLET, S., AND RAVANEL, L., 2008, Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area: *Geophys. Res. Lett.*, v. 35, p. L10502.