

# Scherfestigkeiten von Scherzonen-Gesteinen – Ein Beitrag zur geotechnischen Bewertung von tektonischen Störungen und Gleitzonen von Massenbewegungen D. A. Engl<sup>1</sup>, W. Fellin<sup>2</sup>, C. Zangerl<sup>3</sup>

**Stichworte:** Felsgleitung, Kakirit, Fault Gouge, Spitzenscherfestigkeit, Restscherfestigkeit, Mohr-Coloumb Parameter, Reibungswinkel, Kohäsion

## Zusammenfassung

Kristalline Gesteine wie Gneise, Schiefer und Phyllite sind im alpinen Raum weit verbreitet und häufig Schauplatz tiefgründiger Massenbewegungen. Die Standfestigkeit dieser Hänge hängt dabei untergeordnet von der Gesteinsfestigkeit des Untergrundes ab, sondern wird vielmehr von den Schereigenschaften der Trennflächen und Trennflächenfüllungen im Gebirge bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wurden für Scherprodukte der häufigsten kristallinen Lithologien die Mohr-Coloumb'schen Scherparameter Reibungswinkel und Kohäsion systematisch zusammengetragen und ausgewertet. Um dem Einfluss des Scherweges auf die Scherfestigkeit Rechnung zu tragen, werden Spitzenscherfestigkeiten und reduzierte Scherfestigkeiten bei langen Scherwegen (Restscherfestigkeit) differenziert behandelt. Ziel dieser Datensammlung ist die Bereitstellung von charakteristischen Mittelwerten und Bandbreiten für den praktischen Anwendungsbereich.

## Abstract

The bulk strength of rock masses is strongly controlled by the strength of the discontinuities pervading the intact rock. In many cases, these ruptures are filled with loose rock material produced by shearing along the rupture walls. Depending on the thickness of the soil-like infill layer, the shear strength of the discontinuity is partially or completely determined by the inherent strength of the infill material. Therefore, information about the mechanical behaviour and shear strength of these shear products is crucial when stability analyses have to be performed. Taking this demand into account, numerous investigations dealt with this issue in the past and produced plenty of data by the geotechnical laboratory testing of these materials. The primary aim of this work is firstly to compile and re-analyse published laboratory data about frictional strength properties of shear zone materials and secondly to integrate them into a uniform database. As a result, indicative values for the shear strength parameters of shear zones materials for the most abundant crystalline rocks are obtained.

The presented data compilation does not replace site-specific geotechnical tests for case studies, but can provide assistance for preliminary stability analyses if appropriate geotechnical investigations have not yet been carried out or are not feasible.

<sup>1</sup> D.A. Engl, alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement, Grabenweg 3, 6020 Innsbruck, AUSTRIA; Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau, Universität Innsbruck, Technikerstrasse 13, 6020 Innsbruck, AUSTRIA

<sup>2</sup> W. Fellin, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau, Universität Innsbruck, Technikerstrasse 13, 6020 Innsbruck, AUSTRIA

<sup>3</sup> C. Zangerl, alpS – Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement, Grabenweg 3, 6020 Innsbruck, AUSTRIA

## 1. Einführung

Tiefgreifende Hangdeformationen sind kennzeichnend für alpine Regionen und dort besonders in kristallinen Gesteinen wie Gneisen, Schiefen und Phylliten weit verbreitet. Häufig geben typische Geländeformen wie Doppelgratbildungen und Nackentälchen im Abrissbereich den Hinweis, dass die Gesteinsmassen in Form einer oder mehrerer Schollen entlang definierter Bewegungszonen abgleiten. Vom Standpunkt des Deformationsmechanismus handelt es sich deshalb um Gleitungen (Varnes 1978).

Dieser geomorphologische Eindruck wird vielfach durch Tiefenerkundungen bestätigt. Mit Kernbohrungen werden häufig stark zerbrochene Gesteinshorizonte (Kakiritzonen) durchörtert. Bei aktiven Gleitungen können dabei mithilfe von Inklinometereinrichtungen die Bewegungen im Untergrund erfasst und die aktive(n) Bewegungszone(n) lokalisiert werden. In vielen Fällen grenzt eine basale Scherzone die bewegte Masse scharf gegen den ungestörten Untergrund ab; die Masse selbst erscheint in vielen Fällen kaum oder nur untergeordnet intern deformiert (Noverraz 1996).

Kennzeichnend für diese Bewegungshorizonte ist ein extrem hoher Zerlegungsgrad bis hin zum vollständig aufgelösten Gesteinsverband. Das Material hat vielmehr Lockergesteinscharakter als die Eigenschaften eines Festgesteines. Das Bewegungsverhalten der abgleitenden Felsmasse wird in der Folge nicht durch die generellen Gebirgs- und Gesteinseigenschaften bestimmt, sondern ist vielmehr von den spezifischen Kennwerten und Festigkeiten der Scherprodukte abhängig, welche die Bewegungszone(n) aufbauen.

## 2. Ziel

Die Scherzonen tiefer Felsgleitungen sind in den allermeisten Fällen weder direkt zugänglich noch durch aufwändige Tiefenerkun-

dungen (Bohrungen) erschlossen. Die realistische Einschätzung der Festigkeitseigenschaften in der Bewegungszone spielt jedoch insbesondere dann eine wichtige Rolle, wenn die Stabilität des betreffenden Hanges bewertet werden soll. Unabhängig von der Art der Bewertungsmethode, von einfachen analytischen Methoden bis zu komplexen Diskrete-Elemente- und Finite-Elemente-Modellierungen, ist die Scherfestigkeit des Materials ein Schlüssel-Eingabeparameter, welcher die Ergebnisse und Aussagen einer Stabilitätsanalyse wesentlich beeinflusst. Die Qualität von Bewertungen und Prognosen zum zukünftigen Bewegungsverhalten von Massenbewegungen mit gleitendem Versagensmechanismus sind deshalb in großem Maße von einer ausreichenden Kenntnis der Materialeigenschaften und Materialkennwerte in der Gleitzone abhängig.

Die vorliegende Arbeit versteht sich vordergründig als Bewertungshilfe bei der Einschätzung der zu erwartenden Festigkeiten in Scherzonen tiefgründiger Felsgleitungen. Die im Folgenden ermittelten Materialkennwerte ersetzen nicht eigene fallspezifische Festigkeitsanalysen, die nach Möglichkeit immer anzustreben sind.

## 3. Methodik

Scherfestigkeiten von Fest- und Lockermaterialien werden in der Fels- und Bodenmechanik weit verbreitet mit dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium ausgedrückt. Diesem Umstand Rechnung tragend werden hier für die Beschreibung der spezifischen Scherfestigkeiten der betrachteten Gesteine die Mohr-Coulomb'schen Materialkennwerte Reibungswinkel und Kohäsion herangezogen.

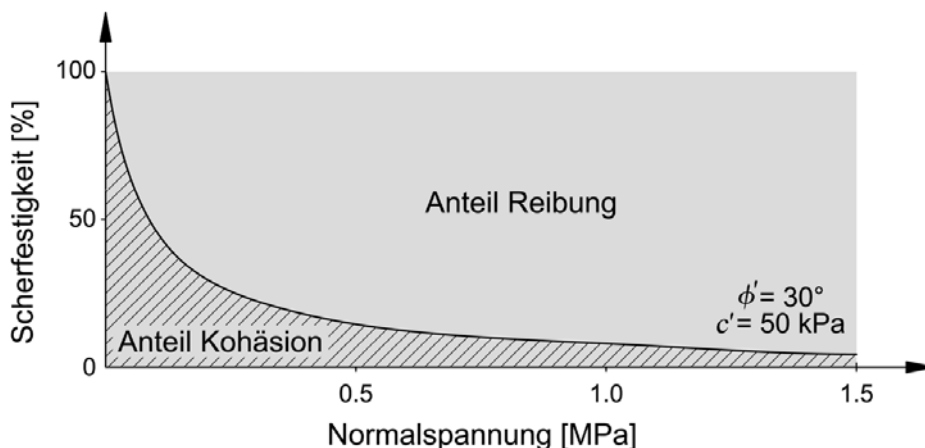
Mit dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium wird die Scherfestigkeit  $\tau_{\text{Versagen}}$  eines Materials durch einen einfachen linearen Zusammenhang mit der in der Scherfuge

wirkenden Normalspannung  $\sigma$  in Beziehung gesetzt.

$$\tau_{\text{Versagen}} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (\text{Gl. 1})$$

Damit ist die Scherfestigkeit eines Fest- oder Lockergesteins keine konstante Größe sondern steigt mit zunehmender Normalspannung  $\sigma$  linear an. Die in Gl. 1 auftretenden Parameter Kohäsion  $c'$  und Reibungswinkel  $\varphi'$  bzw. Reibungskoeffizient  $\mu'$  stellen materialspezifische Kennwerte dar. Dabei beschreibt der Reibungskoeffizient  $\mu'$  bzw. der daraus abgeleitete Reibungswinkel  $\varphi'$  ( $\mu' = \tan \varphi'$ ) den Widerstand, der bei einer Scherverschiebung im Material mobilisiert wird. Dieser der abscherenden Kraft entgegengesetzte Widerstand hängt direkt proportional von der Normalspannung ab, die in der Scherfuge wirkt. Die Kohäsion  $c'$  gibt Auskunft über die im Gestein oder Boden wirkenden Haftkräfte und ist eine von der Normalspannung unabhängige Größe. Die Scherfestigkeit eines Fest- oder Lockergesteins setzt sich damit aus einem normalspannungsabhängigen Teil (Reibungskomponente) und einem normalspannungsunabhängigen Teil (Kohäsionskomponente) zusammen. In der Folge nimmt der Einfluss der Kohäsion auf die Scherfestigkeit mit steigender Normalspannung stetig ab (Fig. 1).

$$\text{Anteil Kohäsion [\%]} = \left[ \frac{c'}{c' + \sigma \tan \varphi'} \right] \cdot 100 \quad (\text{Gl. 2})$$



**Fig. 1:** Anteile der Kohäsion und der Reibungskomponente an der Gesamtscherfestigkeit gemäß Mohr-Coulomb'schem Gesetz (gerechnet mit  $c' = 50 \text{ kN/m}^2$  und  $\varphi' = 30^\circ$ )

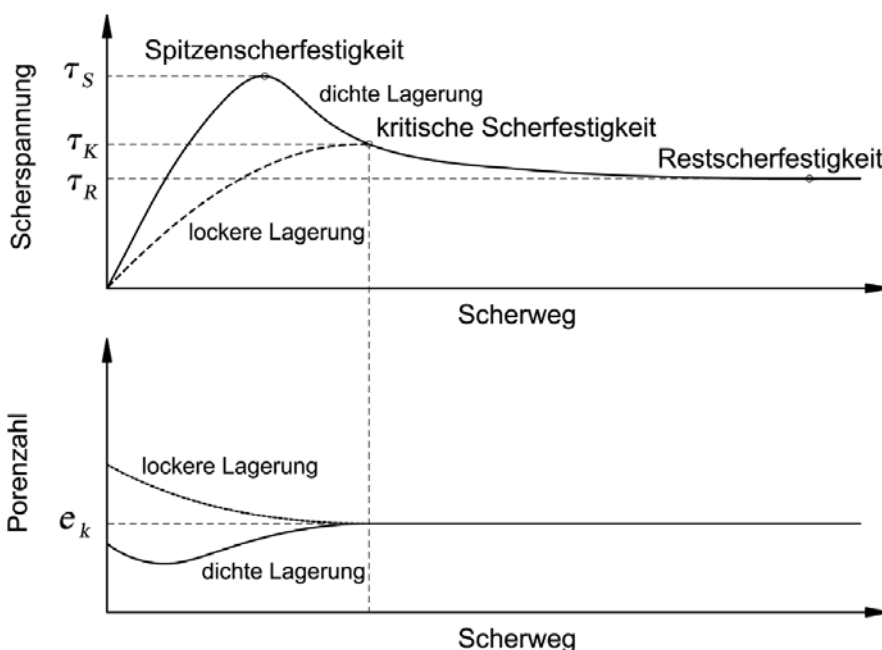
Neben der Normalspannung wirkt sich auch die Verformung maßgeblich auf die Scherfestigkeit aus, denn das Ausmaß des Widerstandes, den ein Material einer Scherverschiebung entgegenbringt, steht in direktem Zusammenhang zum Ausmaß der Deformation, die durch die Verschiebung in der Scherfuge stattfindet. Die Scherfestigkeit ist somit (bei konstanter Normalspannung) auch eine Funktion der Verformung und kann annäherungsweise auch als eine Funktion des Scherweges betrachtet werden. Damit stellt die Verformung einen integrierenden Teil des Bruchkriteriums dar (Fig. 2). Zwei Typen von Festigkeitsentwicklungen sind in Abhängigkeit von der Anfangslagerungsdichte bei zunehmender Scherverschiebung beobachtbar (Fig. 2). Bei dichtgelagerten (nichtbindigen) Lockermaterialien wird der maximale Scherwiderstand  $\tau_s$  (Spitzenscherfestigkeit) schon nach geringen Formänderungen erreicht. Der Boden erfährt zu Beginn der Verschiebung nur mehr eine geringfügige Volumensverminderung (Verdichtung). Bei fortschreitender Scherung findet dann eine progressive Auflockerung des Materials und damit eine Volumenzunahme statt, bis die kritische Porenzahl  $e_k$  erreicht wird. Mit dieser Auflockerung geht die Entfestigung des Materials einher. Die kritische Porenzahl ist einerseits von der Kornverteilung und Kornform, andererseits von der beaufschlagten Normalspannung abhängig. Bei hohen Überlagerungsdrücken ist die Porenzahl im kritischen Grenzzustand tendenziell kleiner als

bei geringen Normalspannungen, weil Dilatation durch die hohen Spannungen behindert wird. Mit Erreichen der kritischen Porenzahl  $e_k$  stellt sich ein konstantes «kritisches» Volumen und damit eine konstante effektive Spannung im Material ein. Der Scherwiderstand in diesem Grenzzustand wird als kritische Scherfestigkeit  $\tau_K$  bezeichnet (Schofield & Wroth 1968, Atkinson & Bransby 1978, Ortigao 1995). Bei lockeren nichtbindigen Böden entwickelt sich keine Spitzenscherfestigkeit (Fig. 2). Unabhängig von der Anfangslagerungsdichte gilt: Sobald das Material in kritischer Lagerungsdichte vorliegt, führen erneute Scherverschiebungen zu keiner weiteren Auflockerung oder Verdichtung des Materials mehr. Wohl aber können Einregelungsprozesse in der Scherfuge noch zu weiteren Festigkeitsreduktionen führen (Fig. 3).

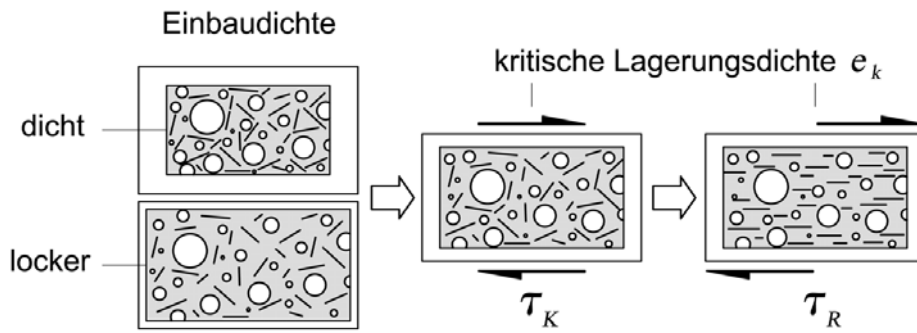
Abhängig von Art und Anteil der Komponenten im Material kommen bei der Entwicklung der Scherfuge unterschiedliche Deformationsmechanismen zum Tragen. In Materialien mit vorwiegend runden Körnern wird eine Scherverschiebung durch «turbulente» Partikelbewegungen (rollende Scherung) aufgenommen; die Einregelung von plättchen- und stängelförmigen Komponenten wird dadurch weitestge-

hend verhindert. Mit steigendem Gehalt an einregelungsfähigen Mineralen wie z. B. Glimmerplättchen und Tonmineralen wird dieser Effekt zunehmend gedämpft. In diesem Fall führt fortschreitende Scherung zu einer Einregelung der plättchenförmigen Partikel, sodass das turbulente rollende Scherregime zunehmend von einem laminaren «gleitenden» Deformationsmechanismus abgelöst wird (Fig. 4; Lupini et al. 1981, Skempton 1985, Mesri & Cepeda-Diaz 1986, Sutton 1995, Withlow 1997). Mit dem maximalen Einregelungsgrad ist der Restscherwiderstand erreicht (vgl. Fig. 3). Diese Restscherfestigkeit  $\tau_R$  (auch residuale Scherfestigkeit) kann als absoluter Minimalwert für die Festigkeit von Reibungsmaterialien verstanden werden (vgl. Fig. 2).

Das Ausmaß der Festigkeitsreduktion vom kritischen Scherwiderstand  $\tau_K$  zum Restscherwiderstand  $\tau_R$  ist direkt vom Anteil der einregelungsfähigen Partikel abhängig (vgl. Fig. 4, Lupini et al. 1981, Stark & Eid 1997). Sind in einem Reibungsmaterial hingegen keine einregelungsfähigen Partikel enthalten, ist der minimale Scherwiderstand bereits mit beginnender Volumenskonstanz erreicht und entspricht damit der kritischen Scherfestigkeit  $\tau_K$  (Skempton 1985).



**Fig. 2:** Festigkeitsentwicklung von dicht und locker gelagerten Böden und Lockergesteinen in Abhängigkeit vom Scherweg (Normalspannung konstant). Bei dichter Lagerung: Nach einmaliger Mobilisierung des Spitzenscherwiderstandes kommt es zu einem kontinuierlichen Festigkeitsabfall. Der absolute Minimalwert des Scherwiderstandes (Restscherfestigkeit) wird in der Regel nach sehr großen Scherwegen erreicht.



**Fig. 3:** Schematische Darstellung der Lagerungsdichte und Orientierung der Partikel in der Boden- oder Lockergesteinsprobe beim i) Einbau, ii) Einstellen der kritischen Scherfestigkeit  $\tau_K$  mit der kritischen Porenzahl  $e_k$  und iii) Erreichen der Restscherfestigkeit  $\tau_R$ .

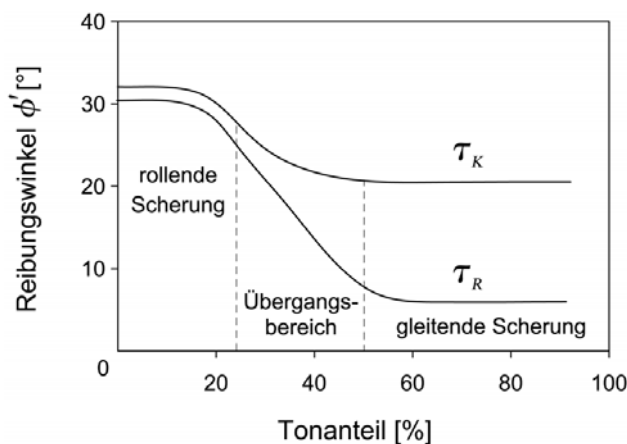
Alle drei Grenzzustände (Spitzenscherfestigkeit, kritische Scherfestigkeit und Restscherfestigkeit) lassen sich unter Berücksichtigung des Mohr-Coulomb'schen Bruchkriteriums jeweils durch ein spezifisches Wertepaar Reibungswinkel - Kohäsion ausdrücken (Fig. 5).

### 3.1 Ausgewertete Materialien

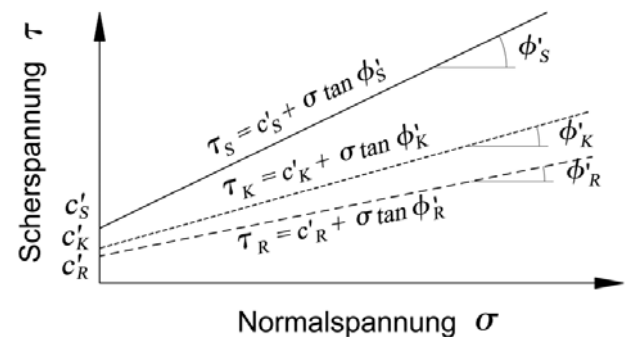
Für die Erstellung einer Datenbank wurden Untersuchungsergebnisse zu Festigkeitseigenschaften von Scherzonengesteinen ausgewertet (Button 2004, Renk 2006, Skempton 1985, TIWAG 1993a, 1993b, Vogelhuber 2007, Weissbach 1979, Xu & de Freitas 1990). Bei den berücksichtigten Materialien handelt es sich einerseits um direkt in der Natur ent-

standene Lockermaterialien aus Gleitzonen von Massenbewegungen (Renk 2006, TIWAG 1993a) oder aus tektonischen Störzonen (Vogelhuber 2007), andererseits auch um künstliche Gesteinszerreibungsprodukte, die im Labor durch Scherung erzeugt wurden (Button 2004, Weissbach 1979).

Die von Vogelhuber (2007) untersuchten Scherzonengesteine stammen aus Tiefbohrungen im Tavetscher Zwischenmassiv Nord (TZM-N) und der angrenzenden Clavaniev-Zone (CZ) in der Schweiz. Es handelt sich um tektonisch stark zerrüttelte metamorphe Gesteinsserien sedimentären Ursprungs (kakiritische Phyllite, Schiefer und Paragneise; Wyder 1998). Weitere geotechnische Untersuchungen an kakiritischen Paragneisen aus dem Ötztal Kristallin (ÖK) in Öster-



**Fig. 4:** Differenz zwischen kritischer und residueller Scherfestigkeit in Anhängigkeit vom Tonanteil (Ringscherversuche mit Sand-Bentonit-Mischungen nach Lupini et al. 1981, modifiziert).



**Fig. 5:** Schematische Darstellung der drei Grenzzustände Spitzenscherfestigkeit  $[c'_S, \phi'_S]$ , kritische Scherfestigkeit  $[c'_K, \phi'_K]$  und Restscherfestigkeit  $[c'_R, \phi'_R]$  als Mohr-Coulomb'sche Grenzgeraden im Normalspannungs-Scherspannungs-Diagramm.

reich wurden von Renk (2006) und TIWAG (1993b) durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Anzahl von Scherversuchen an ungefüllten schieferungsparallelen Klufflächen von phyllitischen Gesteinen sowie an den entsprechenden Scherprodukten ausgewertet (Button 2004, Weissbach 1979).

Unabhängig von der Ausgangslithologie und ihrer Entstehungsart (natürlich oder künstlich) werden die Scherprodukte in der vorliegenden Arbeit in Kakirit und «Fault Gouge» eingeteilt. Als Kakirit wird ein nicht bindiges Lockermaterial bezeichnet, das sich aus vorwiegend kantigen Gesteinsfragmenten unterschiedlichster Größe zusammensetzt (Heitzmann 1985). Aus diesem zunächst nicht bindigen Lockermaterial entstehen durch weitere Scherung und der damit verbundenen Kornzerkleinerung bei hohem Spannungsniveau zunehmend feinere Korngrößen bis hin zum Gesteinsmehl. Im Endstadium bildet sich durch diese mechanische Zerkleinerung und die parallel ablaufende geologische (chemische) Alterierung ein extrem feinkörniges und zumeist bindiges Material, welches als Fault Gouge («Störungsletten») bezeichnet wird. Hohe Schluff- und Tonanteile sind typisch und verleihen diesen Scherprodukten häufig plastische Eigenschaften.

Versuchsergebnisse von folgenden kristallinen Gesteinstypen wurden ausgewertet:

Spitzenscherfestigkeiten von Scherzonengesteinen (tektonische und gravitative Kakirite oder Fault Gouge):

- Quarzphyllit Fault Gouge (Renk 2006)
- Schiefer Kakirit TZM-N/CZ (Vogelhuber 2007)
- Paragneis Kakirit ÖK (Renk 2006, TIWAG 1993a)
- Paragneis Kakirit TZM-N/CZ (Vogelhuber 2007)
- Kristallin Kakirit undifferenziert TZM-N/CZ (Vogelhuber 2007). Diese Kategorie umfasst kristalline Scherzonengesteine aus dem Tavetscherer Zwischenmassiv Nord und der Clavaniev-Zone, die aufgrund unzurei-

chender Beschreibung in der Herkunftsliteratur nicht eindeutig einer der obigen Kategorien zugeordnet werden konnten.

- Moräne (aus kristallinem Einzugsgebiet; Renk 2006, TIWAG 1993b).

Spitzenscherfestigkeiten von Scherversuchen an ungefüllten schieferungsparallelen Klufflächen:

- Phyllite (allgemein, chloritisch, graphitisch, serizitisch; Button 2004)
- Quarzphyllite (Button 2004)
- Kalkphyllite (Button 2004)
- Tonschiefer (Weissbach 1979)

Restscherfestigkeiten von Scherprodukten (hergestellt durch Scherung im Labor):

- Phyllit Kakirit (allgemein, chloritisch, graphitisch, serizitisch; Button 2004)
- Quarzphyllit Kakirit (Button 2004)
- Kalkphyllit Kakirit (Button 2004)
- Ton (Skempton 1985, Xu & de Freitas 1990)

### 3.2 Datenbankstruktur

Als Hauptkennwerte wurden in die Datenbank das Normalspannungsniveau des Laborversuches und die dabei gemessene Scherfestigkeit sowie die daraus ermittelten Materialparameter (Reibungskoeffizient, Reibungswinkel, Kohäsion) aufgenommen. Die Werte wurden dabei direkt aus der Literatur übernommen oder, sofern nicht als Zahlenwerte sondern nur graphisch dargestellt, aus Diagrammen ermittelt. Wenn die gesuchten Werte nicht explizit angeführt oder dargestellt waren, wurden sie nach Möglichkeit mit den vorhandenen Größen nach dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium (Gl. 1) berechnet.

Die Versuchsanordnung, mit welcher die Materialien im Labor auf ihre Festigkeit untersucht wurden, ist von Datensatz zu Datensatz unterschiedlich. Die Materialkennwerte stammen einerseits von Triaxialversuchen, andererseits von Rahmenscher- und Ringscherversuchen. Diese unterschiedlichen Versuchstypen unterscheiden

sich grundlegend in der Art und Weise, wie die Probe abgeschert wird. Während sich beim Triaxialversuch die Scherfuge(n) im Probekörper frei ausbilden können, wird beim Rahmenscher- und Ringscherversuch das Abscheren entlang einer vorgegebenen Scherfuge erzwungen. Dadurch kann es zwischen Scherparametern aus Triaxialversuchen einerseits und aus Scherversuchen andererseits zu geringfügigen Unterschieden kommen.

In Abhängigkeit von der Versuchsart und der Datenlage in den ausgewerteten Quellen ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, um die für die Datenbank erforderlichen Werte von Normalspannung und zugehöriger Scherfestigkeit zu bestimmen.

Auswertung von Scherversuchen (Rahmenscher- und Ringscherversuch):

- 1) Das Normalspannungsniveau des Versuches und die dabei ermittelte Scherfestigkeit des Materials sind direkt angegeben.
- 2) Das Normalspannungsniveau des Versuches sowie die aus dem Versuch ermittelten Parameter Reibungswinkel und Kohäsion sind gegeben. Daraus wird mit der Mohr-Coulomb-Gleichung (Gl. 1) der Wert der Scherfestigkeit berechnet.
- 3) Die im Versuch bestimmte Scherfestigkeit des Materials sowie die daraus ermittelten Parameter Reibungswinkel und Kohäsion sind angegeben. Daraus kann mit Gl. 1 das Normalspannungsniveau des Versuches rückgerechnet werden.

Auswertung von Triaxialversuchen:

- 1) Die Scherfestigkeit und die dazugehörige Normalspannung eines Versuches kann aus dem Mohr-Coulomb'schen Diagramm ( $\tau$  über  $\sigma$ ) abgelesen werden. Die Koordinaten des Tangentenberührungspunktes stellen die Spannungen dar, die tatsächlich beim Versagen der Probe in der Scherfuge aufgetreten sind (Fig. 6).
- 2) Die Radialspannung  $\sigma_3$  und die beim Versagen der Probe erreichte Axialspannung  $\sigma_1$  als auch die daraus ermittelten Para-

meter Reibungswinkel  $\varphi'$  und Kohäsion  $c'$  sind angegeben. Die beim Abscheren tatsächlich in der Scherfuge aufgetretenen Normal- und Scherspannungen sind zunächst nicht bekannt und werden mit den gegebenen Versuchsgrößen anhand der folgenden, vom Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium abgeleiteten Beziehungen berechnet:

$$\sigma_{\text{Scherfuge}} = \frac{\sigma_1(1 - \sin\varphi') + \sigma_3(1 + \sin\varphi')}{2} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\tau_{\text{Scherfuge}} = \cos\varphi' \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (\text{Gl. 4})$$

- 3) Neben den ermittelten Materialkennwerten Reibungswinkel und Kohäsion ist nur die Radialspannung  $\sigma_3$  des Versuches angegeben. Über die beim Versagen der Probe aufgebrauchte Axiallast sind keine Angaben vorhanden. In diesem Fall wird zunächst die maximale Axialspannung  $\sigma_1$  rückgerechnet.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3(1 + \sin\varphi') + 2c \cos\varphi'}{1 - \sin\varphi'} \quad (\text{Gl. 5})$$

Anschließend wird die tatsächlich in der Scherfuge wirkende Normal- und Scherspannung mit Gl. 3 und 4 bestimmt.

Angaben über die Einbaudichte der Lockergesteinsproben liegen nur in Ausnahmefällen vor. Dieser Parameter kann aus diesem Grund in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden, obwohl die Einbau-

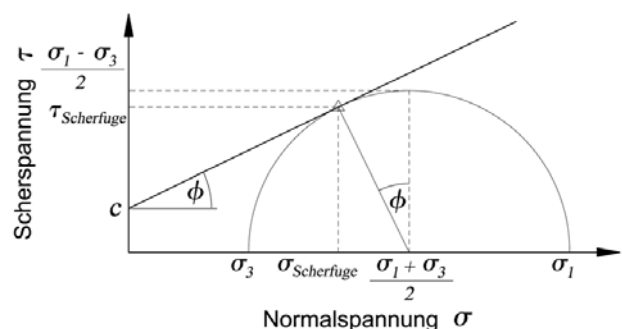


Fig. 6: Schema zur Auswertung von Triaxialversuchen.

dichte des Probenmaterials in die Versuchseinrichtung eine wichtige Randbedingung darstellt und insbesondere die Spitzscherfestigkeit maßgeblich beeinflusst. Für die Restscherfestigkeit sind die fehlenden Angaben über die Einbaudichte hingegen von untergeordneter Bedeutung, da sich bei langen Scherwegen unabhängig von der Anfangs-Einbaudichte die materialspezifische kritische Lagerungsdichte entwickelt

(vgl. Fig. 3). Damit stellen sich sowohl kritische als auch residuelle Festigkeit unabhängig von der anfänglichen Lagerungsdichte auf einen materialspezifischen Wert ein. Beim Aufbau der Datenbank wurde auf eine Unterscheidung zwischen kritischer Scherfestigkeit  $\tau_K$  und Restscherfestigkeit  $\tau_R$  verzichtet, da in zahlreichen Quellen keine ausreichenden Angaben dazu gemacht werden, ob sich die angegebenen Post-Peak-Festigkeit

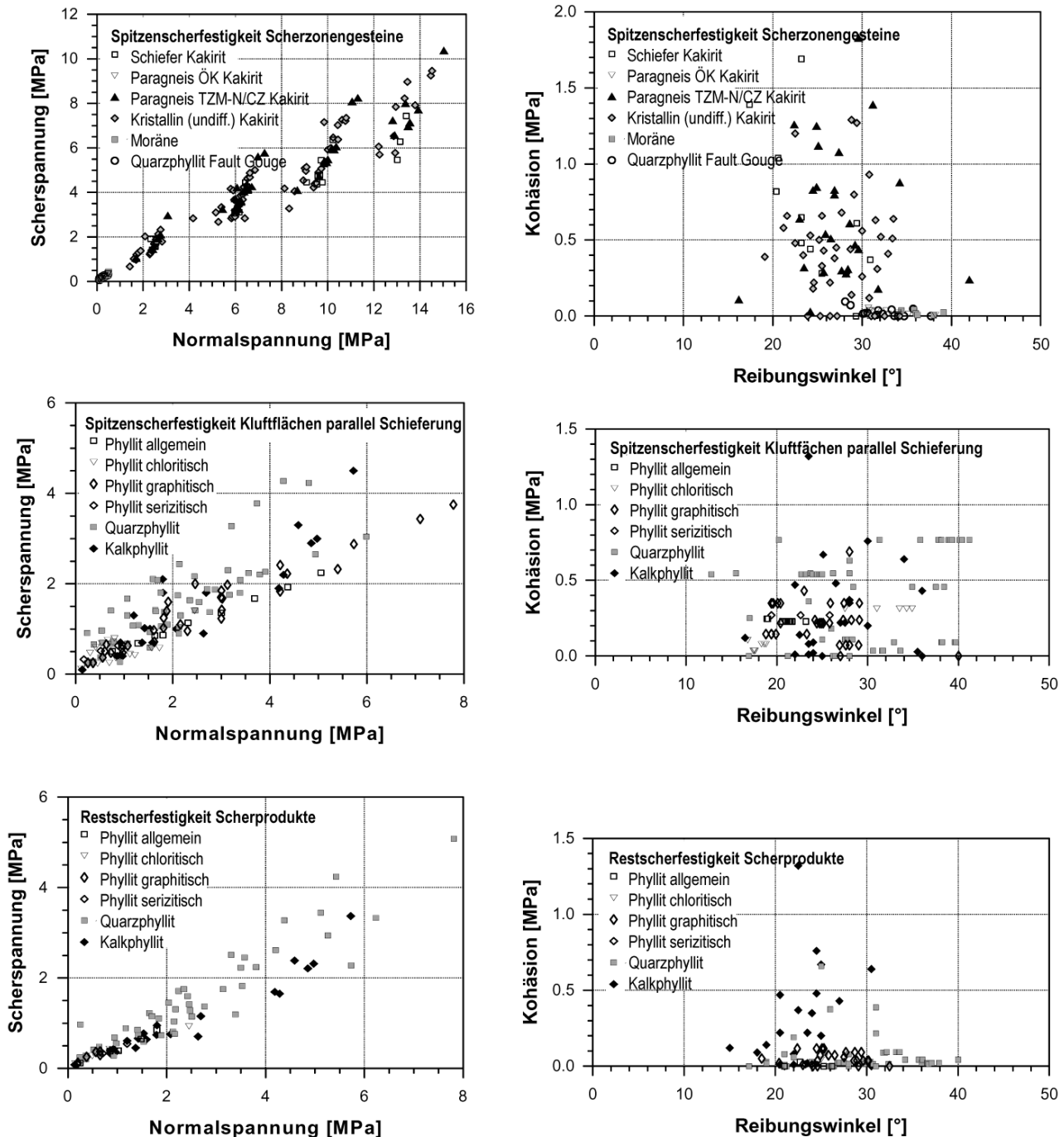


Fig. 7: Sammelplot der Daten im Normalspannung-Scherspannung Diagramm und im Reibungswinkel-Kohäsion Diagramm.



keiten auf den kritischen Grenzzustand (Erreichen der Volumenskonstanz bei der kritischen Porenzahl  $e_k$ ) oder auf das Restscherverhalten des Materiales (finaler Festigkeitsabfall durch Einregelungsprozesse) beziehen. Im Folgenden werden Festigkeiten, die bei großen Scherwegen erreicht wurden, einheitlich als Restscherfestigkeiten bezeichnet. Nichtsdestotrotz soll hervorgehoben werden, dass es sich bei einzelnen Datensätzen tatsächlich um kritische Scherfestigkeiten handeln kann.

Informationen über Versuchstyp, Besonderheiten bei der Versuchsanordnung, Angaben über dränierte/undrainierte Verhältnisse und Scherrate, Länge des zurückgelegten Scherweges und bei der Scherung auftretende Dilatanzwinkel wurden, sofern bekannt, in die Datenbank integriert. Bei der Auswertung konnten diese unterschiedlichen Versuchskonfigurationen nicht miteinbezogen werden.

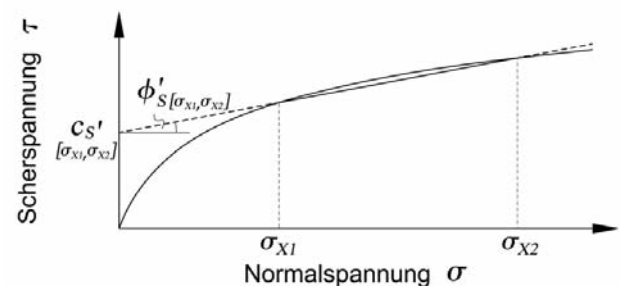
Das Normalspannungsniveau der Scherverversuche ist für die verschiedenen betrachteten Gesteinstypen teilweise unterschiedlich. Da die Spitzenscherfestigkeit dicht gelagerter Böden üblicherweise nicht linear mit der beaufschlagten Normalspannung ansteigt sondern einen gekrümmten Verlauf aufweist, sind die ermittelten Mittelwerte und Bandbreiten der Materialparameter Spitzenreibungswinkel und Spitzenkohäsion deshalb immer nur für den tatsächlich untersuchten Spannungsbereich repräsentativ (Fig. 8). In weiterer Folge sind die Spitzenscherfestigkeitskennwerte unterschiedlicher Lithologien, wenn sie bei unterschiedlichen Normalspannungsbedingungen ermittelt wurden, nur bedingt miteinander vergleichbar. Für die kritische Scherfestigkeit wird in der Regel von einer linearen Abhängigkeit ausgegangen, was häufig experimentell bestätigt wurde (Muir Wood 1991). Für die Restscherfestigkeit sind den Autoren in diesem Zusammenhang keine Untersuchungen bekannt.

In Abhängigkeit vom Gesteinstyp werden statistische Mittelwerte als auch Bandbrei-

ten für Spitzen- und Restscherfestigkeiten ermittelt. Insgesamt wirkt sich die Inhomogenität der Daten in Bezug auf die uneinheitlichen Randbedingungen der Versuche (Normalspannungsniveau, Versuchsanordnung, Lagerungsdichte, ungenaue Unterscheidung zwischen kritischer und residueller Scherfestigkeit) ungünstig auf die Datenzusammenführung und auf die Qualität der Ergebnisse aus. So spiegeln sich die uneinheitlichen Randbedingungen unter anderem in der Streuung der Daten wider. Nichtsdestotrotz lässt die statistische Aufbereitung und Auswertung der Daten deutliche Trends für die verschiedenen Lithologien erkennen.

### 3.3 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Daten wird eine lineare Regressionsanalyse angewandt. Für die Analyse werden die tatsächlich im Labor gemessenen Größen Normalspannung und Scherfestigkeit herangezogen. Die Festigkeitsparameter Reibungskoeffizient bzw. Reibungswinkel und Kohäsion eignen sich hingegen nicht für die statistische Auswertung, da sie von der Normal- und Scherspannung abgeleitet werden und damit sekundäre Größen darstellen. Im Zuge der Auswertung wird im  $\sigma\tau$  Diagramm (Scherfestigkeit über Normalspannung) eine lineare Regression durchgeführt. Durch die Punktwolke der Daten wird dabei jene Gerade gelegt, für welche die Summe der Fehlerquadrate minimal wird.



**Fig. 8:** Die Spitzenscherfestigkeit stellt in der Regel eine konvexe Kurve dar. Mit dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium wird dieser unterlineare Normalspannung-Scherfestigkeit-Zusammenhang für einen definierten Normalspannungsbereich durch eine lineare Beziehung angenähert.

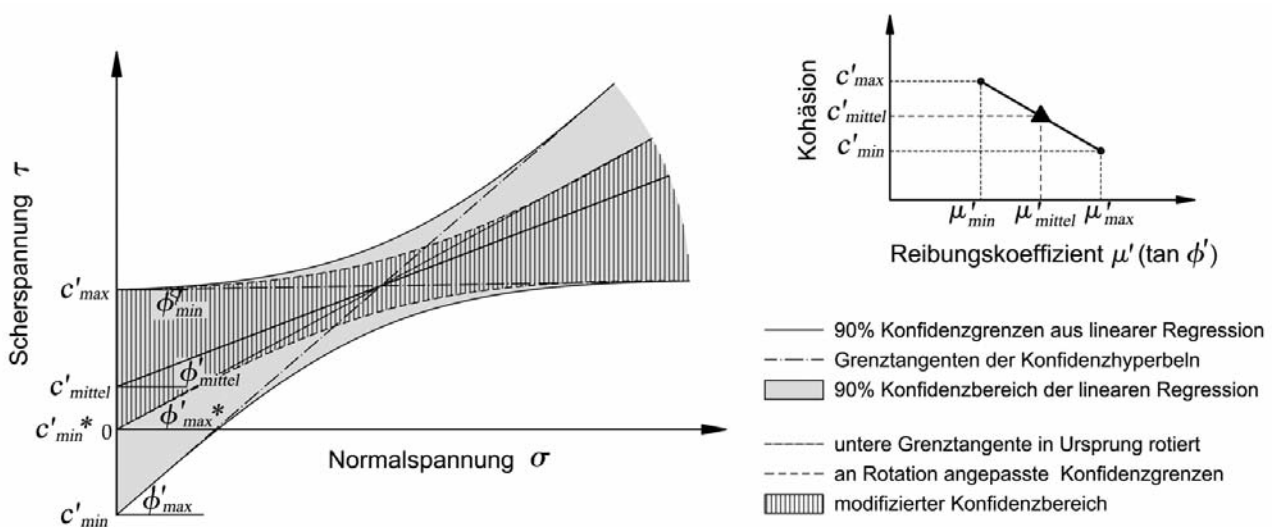
Auf diese Weise wird für jeden Gesteinstyp eine mittlere Mohr-Coulomb'sche Grenzgerade ermittelt (Fig. 5). Der Achsenabschnitt und die Steigung dieser Grenzgeraden definieren die mittleren Festigkeitskennwerte des Materials (mittlere Kohäsion und mittlerer Reibungskoeffizient). Die mittlere Scherfestigkeit bei einer bestimmten Normalspannung errechnet sich mit Gl. 1.

Um der teilweise beträchtlichen Streuung der Daten Rechnung zu tragen, wird die statistische Unsicherheit der Regressionsanalyse mithilfe von Vertrauensgrenzen für normalverteilte Zufallsgrößen ausgedrückt. Hierzu wird für die Regressionsfunktion ein Vertrauensbereich (Konfidenzbereich) von 90% gewählt (Plate 1993). Dieser Vertrauensbereich gibt jenen Bereich im  $\sigma\tau$  Diagramm an, in welchem sich die Regressionsgerade mit 90%iger Wahrscheinlichkeit bewegt und wird durch eine obere und untere Vertrauensgrenze (Konfidenzgrenze) definiert. Die Scherfestigkeit des Materials liegt damit mit 90%iger Wahrscheinlichkeit innerhalb dieser Vertrauensgrenzen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Scherfestigkeit des betrachteten Materials höher bzw. niedriger ist als die durch die obere und untere Vertrauensgrenze definierte Bandbreite, beträgt jeweils 5% (Fellin et al. in Druck). Die Bandbreiten der

abgeleiteten Festigkeitskennwerte Kohäsion und Reibungswinkel beziehen sich ebenfalls auf den 90%-Vertrauensbereich der Regressionsfunktion (Tab. 1-3).

Zusätzlich zur Angabe des Vertrauensbereiches wird die Güte der statistischen Auswertung anhand des Bestimmtheitsmaßes der Regression ( $R^2$ -Wert) angegeben.

Die Vertrauensgrenzen der Regression werden im  $\sigma\tau$  Diagramm durch zwei Hyperbel-Äste abgebildet, welche sich bezüglich der Regressionsgerade spiegelbildlich verhalten (Fig. 9). Zu berücksichtigen gilt, dass innerhalb der Vertrauensgrenzen das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium stets erfüllt sein soll. Die Grenzgerade muss deshalb immer vollständig im Vertrauensbereich der Regression liegen. Daraus ergibt sich, dass nicht jeder Wert aus der Bandbreite des Reibungswinkels mit jedem Wert aus der Bandbreite der Kohäsion kombiniert werden darf. So kann, um das Bruchkriterium zu erfüllen, beispielsweise der maximale Reibungswinkel nur mit der minimalen Kohäsion kombiniert werden und umgekehrt. Die Geraden, welche durch die Kombination des maximalen Reibungswinkels mit dem minimalen Wert der Kohäsion entstehen, und umgekehrt, bilden die Grenz tangenzen zu den Hyperbel-Ästen der oberen und unteren Konfidenzgrenze (Fig. 9).



**Fig. 9:** Schema zur graphischen Interpretation der Regressionsergebnisse: Die mittleren Materialkennwerte  $c'_{mittel}$  und  $\phi'_{mittel}$  ergeben sich aus der Regressionsfunktion. Die Konfidenzgrenzen der Regression werden durch zwei Hyperbel-Äste definiert, deren Tangenten von Geraden mit den Parametern  $c'_{min}$  und  $\phi'_{max}$  bzw.  $c'_{max}$  und  $\phi'_{min}$  gebildet werden.

Im  $\mu'$ - $c'$  Diagramm (Kohäsion über Reibungskoeffizient) liegen alle zulässigen Kombinationen von Reibungskoeffizient und Kohäsion auf einem Geradenabschnitt, welcher sich bezüglich des Mittelwertes symmetrisch verhält (Fig. 9, rechts oben). Dieser Fehlerbalken wird zu beiden Seiten von zwei Punkten begrenzt, welche die Tangenten der Konfidenz-Hyperbeln darstellen. Im  $\varphi'$ - $c'$  Diagramm (Kohäsion über Reibungswinkel) hingegen liegen die Punkte der zulässigen Reibungswinkel-Kohäsion-Kombinationen nicht mehr streng auf einem Geradenabschnitt, sondern auf einer Kurve, da die Linearität durch die Bildung des Arcustangens ( $\varphi' = \arctan \mu'$ ) verloren geht.

Wenn sich aufgrund der großen Streuung eines Datensatzes und der Annahme normalverteilter Zufallsgrößen ein negativer Achsenabschnitt für die untere Vertrauensgrenze und damit eine negative Bandbreiten-Untergrenze für die Kohäsion ergibt, wird eine Tangentenrotation angewendet. Als Rotationspunkt dient dabei der Schnittpunkt der Hyperbel-Tangenten (Fig. 9). Dadurch ergibt sich eine «Erhöhung» des minimalen Kohäsionswertes auf Null bei gleichzeitiger Erniedrigung des maximalen Reibungskoeffizienten. In der Folge entsteht ein modifizierter (eingeschränkter) Vertrauensbereich (Fig. 9). Mit der Rotation der unteren Grenztangente geht auch die Symmetrie im  $\mu'$ - $c'$  Diagramm bzw.  $\varphi'$ - $c'$  Diagramm verloren und es entstehen asymmetrische Fehlerbalken.

Bei Materialien, bei denen die Kohäsion nur einen geringen Anteil an der Materialscherfestigkeit hat, kann es durch die lineare Regression außerdem zu negativen Achsenabschnitten für die Regressionsgerade selbst und damit zu negativen Werten für die mittlere Kohäsion kommen. Um diese physikalisch nicht sinnvollen negativen Kohäsionswerte zu vermeiden, wird die Regressionsanalyse für den betreffenden Datensatz unter Annahme eines Zwangspunktes im Ursprung wiederholt. Daraus ergibt sich ein mittlerer Reibungswinkel unter der Annah-

me, dass  $c'_{\text{mittel}} = 0$ . Der dazugehörige Vertrauensbereich wird hingegen weiterhin durch eine lineare Regression ohne Zwangspunkt im Ursprung ermittelt und anhand des oben dargestellten Rotationsprinzips angepasst.

## 4. Ergebnisse

Die Spitzenscherwiderstände natürlicher Scherzonenmaterialien unterschiedlichster lithologischer Herkunft sind in Tab. 1 zusammengefasst und in Fig. 10 in Diagrammform veranschaulicht. Zu Vergleichszwecken werden die Spitzenscherwiderstände von ungefüllten schieferungsparallelen Trennflächen (Klüften) in unterschiedlichen Phyllittypen angeführt (Tab. 2, Fig. 11). Für dieselben Phyllite wird auch das Restscherverhalten der durch künstliche Scherung erzeugten Scherprodukte (Kakirite) dokumentiert (Tab. 3, Fig. 12).

Zur graphischen Darstellung der materialspezifischen Festigkeitskennwerte und deren Bandbreiten bzw. statistischen Unsicherheiten eignet sich besonders die Diagrammform Kohäsion über Reibungskoeffizient bzw. Reibungswinkel ( $\mu'$ - $c'$  bzw.  $\varphi'$ - $c'$  Diagramme). Die mittleren Materialparameter  $\mu'_{\text{mittel}}$  bzw.  $\varphi'_{\text{mittel}}$  und  $c'_{\text{mittel}}$  bilden jeweils Koordinatenpaare und werden im Diagramm als Punkte dargestellt. Auf den dazugehörigen Fehlerbalken liegen alle zulässigen  $\mu'$ - $c'$  bzw.  $\varphi'$ - $c'$  Kombinationen innerhalb der 90%-Vertrauensgrenzen (Fig. 9). Aus der Länge des Fehlerbalkens wird deutlich, in welchem Ausmaß die Materialkennwerte für einen bestimmten Gesteinstyp streuen. Die Orientierung des Fehlerbalkens gibt qualitativ Auskunft darüber, inwieweit die Gesamtunsicherheit der Scherfestigkeit von der Unsicherheit der Reibungskomponente einerseits und der Kohäsion andererseits bestimmt wird. Je flacher der Fehlerbalken desto größer der Einfluss des Reibungskoeffizienten bzw. des Reibungswinkels, je steiler der Fehlerbalken desto größer der Einfluss der Kohäsion auf die Gesamtunsicherheit.

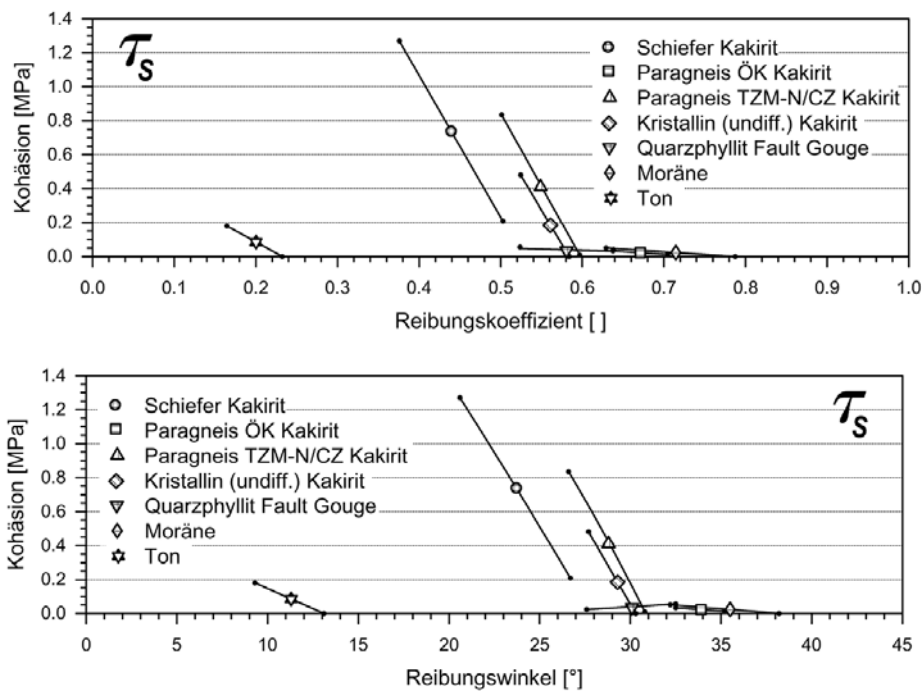
Parallel dazu nimmt der Einfluss der Kohäsion auf die Gesamtscherfestigkeit mit steigender Normalspannung ab (Fig. 1, Fig. 13). Während deshalb bei niedrigen Normalspannungen die Unsicherheit der berechneten Materialscher-

festigkeit vor allem von der Unsicherheit der Kohäsion verursacht wird, nimmt mit zunehmender Normalspannung der Einfluss des Reibungswinkels und dessen Unsicherheit auf die Gesamtscherfestigkeit zu.

	$\mu'_{S_{mittel}}$ $\mu'_{S_{min}} - \mu'_{S_{max}}$ 90% Konfidenz [ ]	$\varphi'_{S_{mittel}}$ $\varphi'_{S_{min}} - \varphi'_{S_{max}}$ 90% Konfidenz [°]	$c'_{S_{mittel}}$ $c'_{S_{min}} - c'_{S_{max}}$ 90% Konfidenz [kPa]	$\sigma$ [MPa]	R <sup>2</sup>	n	Referenzen
<u>Kakirite</u>							
Schiefer	0.44	23.7	739	2–14	0.88	21	Vogelhuber (2007)
TZM–N/CZ	0.38 – 0.50	20.6 – 26.7	209 – 1270				
Paragneis	0.67	33.9	23	0.1–0.5	0.98	30	Renk (2006)
ÖK	0.64 – 0.70	32.5 – 35.2	12 – 33				TIWAG (1993a)
Paragneis	0.55	28.8	422	0.7–13	0.90	44	Vogelhuber (2007)
TZM–N/CZ	0.50 – 0.60	26.6 – 30.8	10 – 834				
Kristallin	0.56	29.3	184	1.5–13	0.90	75	Vogelhuber (2007)
TZM–N/CZ (undifferenziert)	0.52 – 0.58*	27.7 – 30.3*	0* – 481				
<u>Fault Gouge</u>							
Quarzphyllit	0.58	30.1	39	0.1–0.5	0.88	42	Renk (2006)
	0.52 – 0.64	27.6 – 32.5	23 – 55				
<u>Sonstige</u>							
Moräne	0.71	35.5	23	0.1–0.5	0.92	21	Renk (2006)
	0.63 – 0.79*	32.2 – 38.2*	0* – 51				TIWAG (1993b)
Ton	0.20	11.3	84	0.25–5	0.95	8	Skempton (1985), Xu & de Freitas (1990)
	0.16 – 0.23*	9.3 – 13.1*	0* – 180				

\* Der Wert wurde nach der linearen Regression durch eine Rotation der Grenztangente der Konfidenzhyperbeln in den Ursprung ermittelt.

**Tab. 1:** Übersicht der mittleren sowie minimalen und maximalen Werte (90% Konfidenz) der Spitzenscherparameter verschiedener kristalliner Scherprodukte, ermittelt durch Regressionsanalysen im  $\sigma$ - $\tau$  Diagramm.  $\mu'_S$ : Spitzenreibungskoeffizient,  $\varphi'_S$ : daraus abgeleiteter Spitzenreibungswinkel,  $c'_S$ : Spitzenkohäsionswert.  $\sigma$ : Normalspannungsbereich der Regression, R<sup>2</sup>: Bestimmtheitsmaß der Regression, n: Anzahl der ausgewerteten Daten. Zur Berechnung der Scherfestigkeit  $\tau_S$  können die zulässigen  $\mu'_S$ - $c'_S$  bzw.  $\varphi'_S$ - $c'_S$  Kombinationen aus Fig. 10 abgelesen werden.



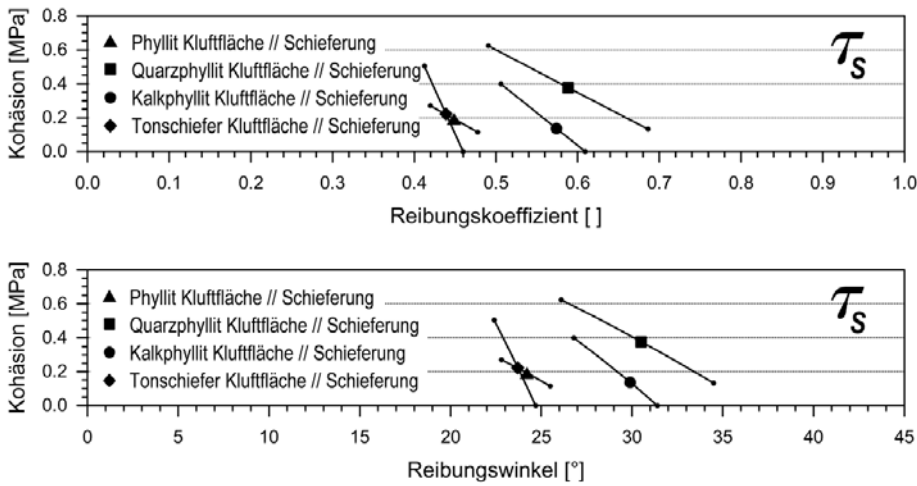
**Fig. 10:** Darstellung der mittleren Materialkennwerte und Bandbreiten (90% Konfidenz) des Spitzenscherwiderstandes verschiedener kristalliner Scherprodukte im  $\mu'_S$ - $c'_S$  Diagramm (Kohäsion über Reibungskoeffizient, oben) und im  $\varphi'_S$ - $c'_S$  Diagramm (Kohäsion über Reibungswinkel, unten). Die Steigung der Fehlerbalken gibt den anteiligen Einfluss der Parameterunsicherheiten auf die Unsicherheit der Gesamtscherfestigkeit an.

**Spitzenscherwiderstände an schieferungsparallelen Klufflächen (ungefüllt)**

Klufffläche	$\mu'_{S\text{mittel}}$	$\varphi'_{S\text{mittel}}$	$c'_{S\text{mittel}}$	$\sigma$	R <sup>2</sup>	n	Referenzen
	$\mu'_{S\text{min}} - \mu'_{S\text{max}}$	$\varphi'_{S\text{min}} - \varphi'_{S\text{max}}$	$c'_{S\text{min}} - c'_{S\text{max}}$				
	90% Konfidenz	90% Konfidenz	90% Konfidenz				
	[ ]	[°]	[kPa]	[MPa]			
<b>Phyllit</b>	0.45	24.2	192	0–8	0.92	58	Button (2004)
(undifferenziert)	0.42 – 0.48	22.8 – 25.5	114 – 270				
<b>Quarzphyllit</b>	0.59	30.5	377	0.2–6	0.67	52	Button (2004)
	0.49 – 0.69	26.1 – 34.5	132 – 623				
<b>Kalkphyllit</b>	0.57	29.9	136	0–13	0.91	22	Button (2004)
	0.51 – 0.61*	26.8 – 31.4*	0* – 399				
<b>Sonstige</b>							
<b>Tonschiefer</b>	0.44	23.7	222	0.1–25	0.99	6	Weißbach (1979)
	0.41 – 0.46*	22.4 – 24.7*	0* – 503				

\* Der Wert wurde nach der linearen Regression durch eine Rotation der Grenztangente der Konfidenzhyperbeln in den Ursprung ermittelt.

**Tab. 2:** Übersicht der mittleren sowie minimalen und maximalen Werte [90% Konfidenz] der Spitzenscherparameter von ungefüllten schieferungsparallelen Klufflächen, ermittelt durch Regressionsanalysen im  $\sigma$ - $\tau$  Diagramm.  $\mu'_S$ : Spitzenreibungskoeffizient,  $\varphi'_S$ : daraus abgeleiteter Spitzenreibungswinkel,  $c'_S$ : Spitzenkohäsionswert.  $\sigma$ : Normalspannungsbereich der Regression, R<sup>2</sup>: Bestimmtheitsmaß der Regression, n: Anzahl der ausgewerteten Daten. Zur Berechnung der Scherfestigkeit  $\tau_S$  können die zulässigen  $\mu'_S$ - $c'_S$  bzw.  $\varphi'_S$ - $c'_S$  Kombinationen aus Fig. 11 abgelesen werden.



**Fig. 11:** Darstellung der mittleren Materialkennwerte und Bandbreiten (90% Konfidenz) der Spitzenscherwiderstände in ungefüllten schieferungsparallelen Kluffflächen im  $\mu'_s$ - $c'_s$  Diagramm (Kohäsion über Reibungskoeffizient, oben) und im  $\varphi'_s$ - $c'_s$  Diagramm (Kohäsion über Reibungswinkel, unten).

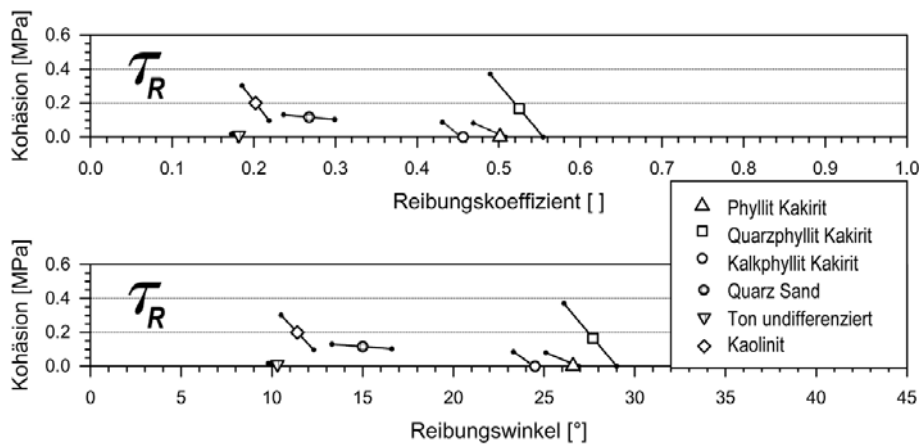
### Restscherwiderstände von Scherprodukten (Lockermaterial)

	$\mu'_{Rmittel}$	$\varphi'_{Rmittel}$	$c'_{Rmittel}$				
	$\mu'_{Rmin} - \mu'_{Rmax}$	$\varphi'_{Rmin} - \varphi'_{Rmax}$	$c'_{Rmin} - c'_{Rmax}$	$\sigma$	R <sup>2</sup>	n	Referenzen
	90% Konfidenz	90% Konfidenz	90% Konfidenz	[MPa]			
	[ ]	[°]	[kPa]				
<b>Kakirit</b>							
Phyllit (undifferenziert)	0.50 0.47 – 0.51*	26.6 25.1 – 26.9*	13 0* – 81	0 – 4.5	0.95	35	Button (2004)
Quarzphyllit	0.53 0.49 – 0.55*	27.7 26.1 – 29.0*	167 0* – 370	0 – 21	0.93	50	Button (2004)
Kalkphyllit	0.45** 0.43 – 0.45*	24.4** 23.3 – 24.4*	0** 0* – 86	0 – 13	0.97	22	Button (2004)
<b>Sonstige</b>							
Ton (undifferenziert)	0.18* 0.17 – 0.18*	10.3* 9.8 – 10.3*	0* 0* – 6	0 – 5	0.99	18	Xu & de Freitas (1990), Skempton (1985)
Kaolinit	0.20 0.18 – 0.22	11.4 10.5 – 12.3	200 97 – 302	1 – 9	0.99	7	Bos et al. (2000)
Quarzsand	0.27 0.24 – 0.30	15.0 13.3 – 16.6	117 103 – 130	0 – 0.6	0.98	8	Chambon et al. (2002)

\* Der Wert wurde nach der linearen Regression durch eine Rotation der Grenztangente der Konfidenzhyperbeln in den Ursprung ermittelt.

\*\* Der Mittelwert wurde durch lineare Regression mit Zwangspunkt im Ursprung ermittelt.

**Tab. 3:** Übersicht der Materialkennwerte des Restscherwiderstandes verschiedener phyllitischer Scherprodukte, ermittelt durch Regressionsanalysen im  $\sigma$ - $\tau$  Diagramm.  $\mu'_s$ : Spitzenreibungskoeffizient,  $\varphi'_s$ : daraus abgeleiteter Spitzenreibungswinkel,  $c'_s$ : Spitzenkohäsionswert.  $\sigma$ : Normalspannungsbereich der Regression, R<sup>2</sup>: Bestimmtheitsmaß der Regression, n: Anzahl der ausgewerteten Daten. Zur Berechnung der Scherfestigkeit  $\tau_s$  können die zulässigen  $\mu'_s$ - $c'_s$  bzw.  $\varphi'_s$ - $c'_s$  Kombinationen aus Fig. 12 abgelesen werden.

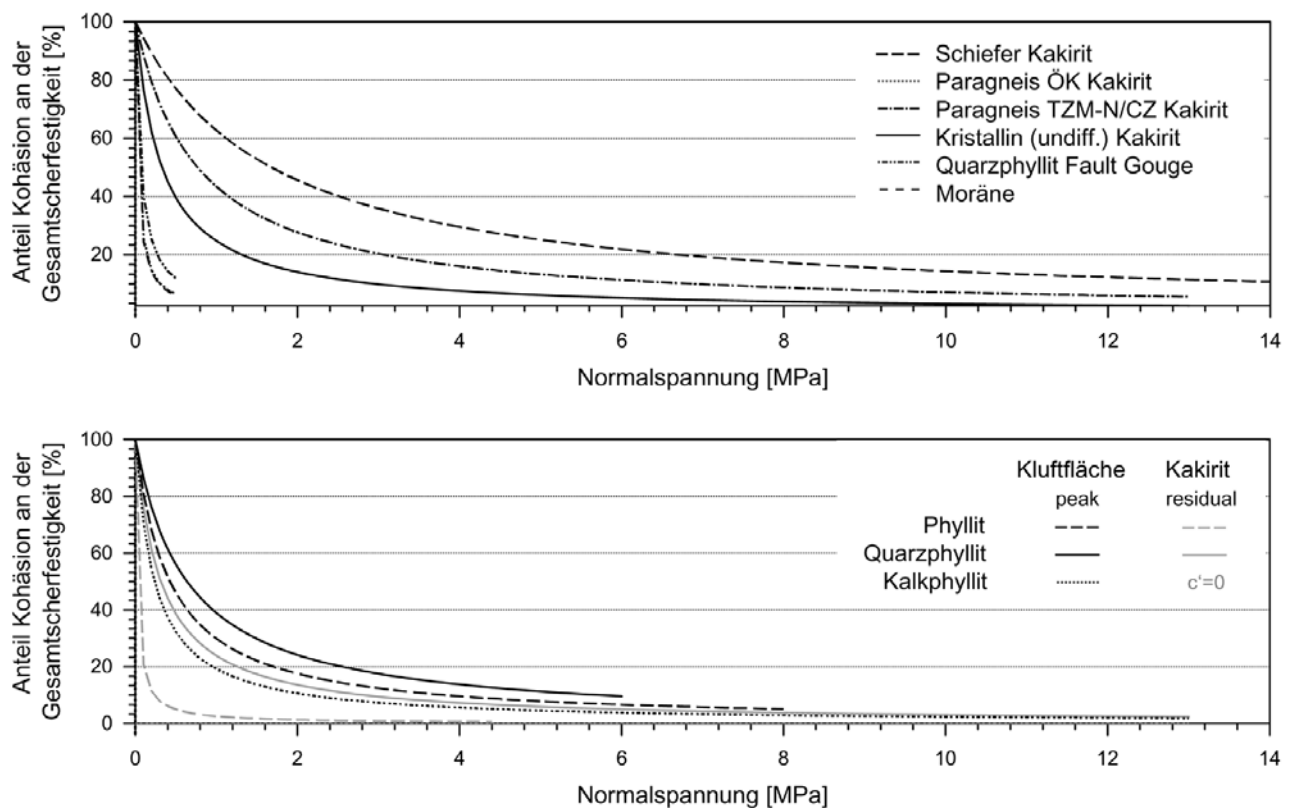


**Fig. 12:** Darstellung der mittleren Materialkennwerte und Bandbreiten (90% Konfidenz) der Restscherwiderstände verschiedener phyllitischer Scherprodukte im  $\mu'_R-c'_R$  Diagramm (Kohäsion über Reibungskoeffizient, oben) und im  $\varphi'_R-c'_R$  Diagramm (Kohäsion über Reibungswinkel, unten).

## 5. Interpretation und Diskussion

Die unterschiedlichen Normalspannungsniveaus, bei welchen die Scherfestigkeiten der Materialien ermittelt wurden, erlauben nur fallweise unmittelbare Vergleiche zwischen den verschiedenen Lithologien. So wurden die Spitzenscherfestigkeiten der Kakirite der Ausgangsgesteine Paragneis, Schiefer und Kristal-

lin (undifferenziert) aus dem Tavetscher Zwischenmassiv Nord und der Clavaniev-Zone bei hohen Normalspannungen von bis zu 14 MPa ermittelt (Daten aus Vogelhuber 2007). Die Regressionsergebnisse sind als Mittelwerte für diesen Spannungsbereich anzusehen; für die Berechnung der Materialfe-

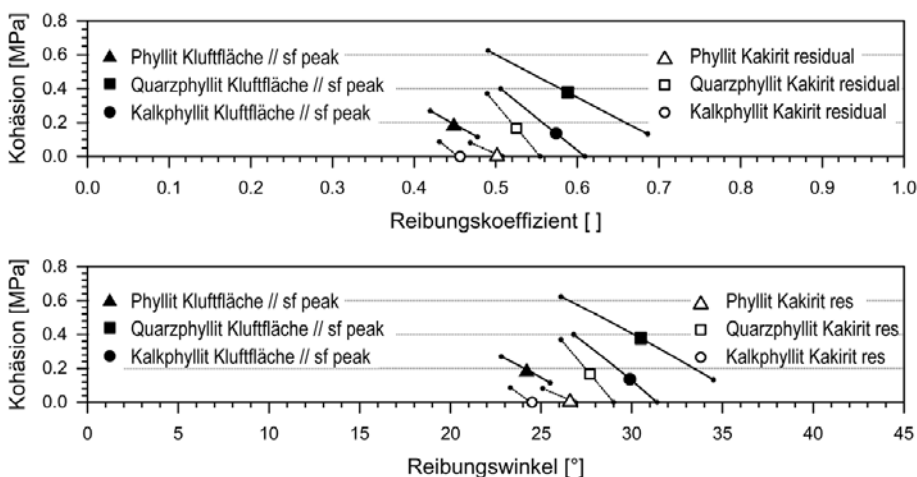


**Fig. 13:** Anteil der Kohäsion am Gesamtscherwiderstand, berechnet nach Mohr-Coulomb (Gl. 1) mit den Mittelwerten aus Tab. 1-3. Für die analysierten kristallinen Scherprodukte gilt, dass die Scherfestigkeiten ab einer Normalspannung von 5-6 MPa zu rund 80-90% vom Reibungswinkel und nur untergeordnet (10-20%) von der Kohäsion abhängen.

stigkeit bei geringen Normalspannungen ( $< 1$  MPa) eignen sich diese Materialparameter nur mit Vorbehalt. Die Spitzenscherfestigkeiten der Gesteinstypen Paragneis ÖK, Quarzphyllit Fault Gouge und Moräne wurden hingegen bei dazu verhältnismäßig geringen Normalspannungen bis 1 MPa ermittelt (Daten aus Renk 2006 und TIWAG 1993 a, b). Sie zeigen generell geringere Kohäsionsbeteiligungen an der Gesamtscherfestigkeit bei gleichzeitig höheren Reibungskomponenten. Diese gemeinsamen Merkmale dürften durch das verhältnismäßig geringe Normalspannungsniveau der Versuche begründet sein. Der in Fig. 10 erkennbare Trend von sinkenden Reibungswinkeln bei gleichzeitig steigenden Kohäsionswerten wird demnach durch die unterschiedlichen Normalspannungsbereiche, für welche die abgebildeten Materialkennwerte gültig sind, erzeugt und spiegelt indirekt die Form der Mohr'schen Einhüllenden wider (vgl. Fig. 8). Aus Fig. 10 wird außerdem deutlich, dass mit steigendem Kohäsionswert sich die Unsicherheit dieses Parameters erhöht. Daraus ergibt sich, dass größere Werte für die Kohäsion zunehmende Unsicherheit in die rechnerische Scherfestigkeit eines Materials bringen.

Bei den phyllitischen Gesteinen (Phyllit undifferenziert, Quarzphyllit und Kalkphyllit) sind neben den Spitzenscherwiderständen der ungefüllten schieferungsparallelen Klufflächen auch die Restscherfestigkeiten des durch die Scherung allmählich erzeugten Lo-

ckermaterials (Kakirits) bekannt (Daten aus Button 2004). Es ermöglicht damit einen direkten Vergleich der Spitzenscherwiderstände der zunächst ungefüllten Trennflächen mit der Restscherfestigkeit der im Zuge der Scherung gebildeten Kakirite. Bei Quarzphylliten und Kalkphylliten zeigt sich dabei eine klare Festigkeitsreduktion durch die Bildung eines Kakirites in der Scherfuge, indem sowohl Kohäsion und Reibungswinkel sinken. Bei den Phylliten (allgemein, graphitisch, chloritisch, serizitisch) hingegen kommt es mit der Scherverformung nur zu einem Kohäsionsverlust, die Reibungskomponente der Scherfestigkeit steigt relativ an (Fig. 14). Dies lässt sich durch den Übergang von reiner Gleitreibung an der Schieferungsfläche zu Rollreibung im Kakirit zurückführen, da die makroskopische Reibung von Granulaten im allgemeinen höher ist als die Kontaktreibung zwischen den Partikeln (Guo & Su 2007, Mair et al. 2002, Thornton 2000). Aufgrund der gleichen Randbedingungen bei der Festigkeitsbestimmung sind in diesem Fall die verschiedenen Lithologien miteinander vergleichbar. Den größten Scherwiderstand in der Schieferungsfläche als auch die größte Restscherfestigkeit als Kakirit besitzt der Quarzphyllit, der sich von den anderen (quarzarmen) Phylliten besonders durch die hohen Kohäsionswerte abhebt. Die Kakirite von Phyllit (undifferenziert) und Kalkphyllit hingegen verhalten sich im Residualstadium wie reine Reibungsmaterialien ( $c'_{\text{mittel}} = 0$ ). Die steigende Reibungskomponente



**Fig. 14:** Vergleichende Darstellung der mittleren Materialkennwerte und Bandbreiten (90% Konfidenz) der Spitzenscherwiderstände von zunächst ungefüllten schieferungsparallelen Klufflächen und der Restscherwiderstände der später mit Gesteinszerreißel (Kakirit) gefüllten Scherfugen.



mit zunehmendem Quarzgehalt bei den Restscherfestigkeiten ist durch die Behinderung bzw. Reduktion von gleitender Scherung entlang von Glimmerplättchen durch die Quarzkörner zurückzuführen (Button 2004, Lupini et al. 1981, Skempton 1985). Die geringste Endrestscherfestigkeit weist der Kalkphyllit Kakirit auf.

Angaben zu den Restscherwiderständen der Kakirite aus dem Tavetscher Zwischenmassiv Nord und der Clavaniev-Zone (Schweiz) sowie dem Ötztal Kristallin (Österreich) waren in der ausgewerteten Literatur nicht verfügbar. Über die Festigkeitsverluste dieser Gesteine bei größeren Scherwegen, wie sie in der Regel bei Felsgleitungen auftreten, können in der vorliegenden Arbeit keine Aussagen gemacht werden. Weitere umfassende Untersuchungen zum Verhalten kristalliner Scherprodukte bei langen Scherwegen wären deshalb im Hinblick auf Massenbewegungen sinnvoll.

## 6. Schlussfolgerungen

Zum Spitzenscherverhalten von Scherprodukten kristalliner Herkunft konnten in der vorliegenden Arbeit eine Reihe von Untersuchungen aus der Literatur bearbeitet werden. Die in Hinblick auf ihre Restscherfestigkeit betrachteten und ausgewerteten Materialien beschränken sich hingegen auf drei Kakirittypen. Für die Festigkeitsbewertung wurden sowohl Mittelwerte als auch Bandbreiten der Materialkennwerte Reibungswinkel und Kohäsion ermittelt. Die zum Teil beträchtlichen Streuungen der Daten sind vor allem auf die natürlichen Heterogenitäten der Scherzonen-gesteine als auch auf die unterschiedlichen Versuchsbedingungen zurückzuführen, unter welchen die Materialien auf ihre Festigkeit geprüft wurden. Diese uneinheitlichen Randbedingungen wirken sich insgesamt ungünstig auf die Ergebnisse der vorliegenden Datenkompilation aus. In keinem der Fälle war es möglich für ein spezifisches Material sowohl Kennwerte zur Spitzenscherfestigkeit als auch zum Restscherverhalten zu analysie-

ren.

Die in den Tabellen Tab. 1 - 3 angeführten Werte für Reibungswinkel und Kohäsion sind für die jeweilig angegebenen Spannungsbereiche gültig und sollten nicht zu anderen Normalspannungen extrapoliert werden. Angesichts der variablen Spannungsniveaus ist außerdem ein unmittelbarer Vergleich zwischen den verschiedenen Gesteinstypen nur beschränkt zulässig.

Untersuchungen zu Spitzenscherwiderständen von natürlichen Materialien sind in der Literatur weit häufiger vertreten als Informationen zu Restscherfestigkeiten, da erstere das für angewandte Fragestellungen häufig ausschlaggebende Erstversagen des Materials charakterisieren. Über das Restscherverhalten von Scherprodukten kristalliner Ausgangsgesteine konnten im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Datenlage in der ausgewerteten Literatur nur wenige Aussagen gemacht werden. Zielführend für das bessere Verständnis der langfristigen Festigkeitseigenschaften sind deshalb weitere umfassende Untersuchungen unter gut definierten Randbedingungen. In Hinblick auf Massenbewegungen sind besonders Ringscherversuche mit unbegrenzt langen Scherwegen sinnvoll.

Vorrangiges Ziel dieser Datensammlung ist die Bereitstellung von Richtwerten bzw. Bandbreiten für die Festigkeitskennwerte von Scherprodukten verschiedenster Gesteinstypen. Die vorliegende Arbeit versteht sich vor allem als Bewertungshilfe bei der Einschätzung der Festigkeit von Scherzonen bei geologisch-geotechnischen Fragestellungen. Die praktische Bedeutung liegt in der für diverse Modellierungsansätze notwendigen geotechnischen Charakterisierung von massenbewegungsinduzierten Gleitbahnen oder von präexistierenden tektonischen Scherzonen, welche häufig für gravitative Prozesse reaktiviert werden. In der Praxis ist bei Felsgleitungen das Beproben der Gleitzone(n) mit sehr hohem finanziellen Aufwand verbunden und nur in Ausnahmefällen rechtfertigbar. In diesen Fällen kann für den entsprechenden Gesteinstyp die in dieser Arbeit ermittelte

Festigkeitsbandbreite für das Scherprodukt einen ersten Anhaltspunkt zur Einschätzung der Festigkeit in der Gleitzone geben. In den Ausnahmefällen, in denen Material direkt aus der Scherzone gewonnen werden kann und somit leicht zur Verfügung steht, ersetzen diese Durchschnittswerte keinesfalls eigene geotechnische Untersuchungen und Festigkeitsanalysen, sondern sollten dann ausschließlich vergleichend herangezogen werden. Die in der Laborpraxis meist aus einer geringen Anzahl von Versuchen (meist drei Versuche) ermittelten Mohr-Coulomb-Parameter können dabei durch einen Vergleich mit Mittelwerten und Bandbreiten aus Tab. 1 - 3 auf ihre Plausibilität geprüft werden.

### **Danksagung**

Die Autoren danken der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG), A-6020 Innsbruck; ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH, A-6063 Rum; p+w Baugrund + Wasser GEO-ZT GmbH, A-6060 Hall; alpECON Wilhelmy KEG, A-6165 Telfes; der Kplus-FFG und der Tiroler Zukunftsstiftung für die Unterstützung des alpS-Forschungsprojektes 1.3AC Prozessanalyse und Prognose von Massenbewegungen.

## Literatur

- Atkinson, J.H. & Bransby, P.L. 1978: The mechanics of soils – An introduction to critical state soil mechanics. McGraw-Hill, London.
- Button, E.A. 2004: A contribution to the characterization of phyllitic and schistose rock masses for tunnelling. Gruppe Geotechnik Graz, Heft 22, Graz, 1-134.
- Fellin, W., Berghammer, S. & Renk, D. (in Druck): Konfidenzgrenzen der Scherfestigkeit als Grundlage zur Festlegung charakteristischer Scherparameter. geotechnik.
- Guo, P. & Su, X. 2007: Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials. *Can. Geotech. J.* 44, 579-591.
- Heitzmann, P. 1985: Kakirite, Kataklasite, Mylonite – Zur Nomenklatur der Metamorphite mit Verformungsgefügen. *Eclogae geol. Helv.* 78, 273-286.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E. & Vaughan, P.R. 1981: The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique* 31, No. 2, 181-213.
- Mair, K., Frye, K.M. & Marone, C. 2002: Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones. *Journal of Geophysical Research*, 107(B20), 4-1 – 4-9.
- Mesri, G. & Cepeda-Díaz, A.F. 1986: Residual strength of clays and shales. *Géotechnique* 36, No. 2, 269-274.
- Muir Wood, D. 1991: Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge University Press.
- Noverraz, F. 1996: Sagging or deep-seated creep: fiction or reality? *Proc. 7th Int. Symp. on Landslides, Trondheim (Norway)*, Balkema, Rotterdam, 821-828.
- Ortigao, J.A.R. 1995: Soil mechanics in the light of critical state theories: An introduction. Balkema Rotterdam.
- Plate, E.J. 1993: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Ernst & Sohn.
- Renk, D. 2006: Geotechnische Untersuchungen von Gleitzonenmaterialien großer Hangbewegungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1-119.
- Schofield, A. & Wroth, P. 1968: Critical state soil mechanics. McGraw Hill, London.
- Skempton, A.W. 1985: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique* 35, No. 1, 3-18.
- Stark, T.D. & Eid, H.T. 1997: Slope stability analyses in stiff fissured clays. *Journal of Geotech. and Geoenviron. Engineering*, Vol. 123, No. 4, 335-343.
- Sutton, B.H.C. 1995: Solving Problems in Soil Mechanics (2nd ed.). Prentice-Hall, USA.
- Thornton, C. 2000: Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media. *Géotechnique* 50, No. 1, 43-53.
- TIWAG 1993a: Ktw Prutz – Bohrung Klasgarten: Erdphysikalische und chemische Untersuchungen – BP 6344. Unveröffentlichter Bericht WK 232-0012, Innsbruck.
- TIWAG 1993b: BL Prutz: Erdphysikalische Untersuchungen Bohrung Hochmais. Unveröffentlichter Bericht WK 232-0014, Innsbruck.
- Varnes, D.J. 1978: Slope movements Types and Processes. – In: Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (Hrsg.): Special Report 176: Landslides: Analysis and Control, National Research Council. Washington, 11-33.
- Vogelhuber, M. 2007: Der Einfluss des Porenwasserdruckes auf das mechanische Verhalten kakiritisierter Gesteine. Dissertation ETH Zürich, Zürich.
- Weissbach, G. 1979: Die Veränderlichkeit des Restscherwiderstandes von Gesteinstrennflächen. *Bochumer geol. Geotechn. Arb. No. 1*, Bochum, 1-184.
- Whitlow, R. 1997: Basic soil mechanics (3rd ed.). Prentice-Hall, USA.
- Wyder, R.F. 1998: Fluid impregnation and development of fault breccias in the Tavetscher basement rocks (Sedrun, Central Swiss Alps). *Tectonophysics* 294, 89-107.
- Xu, S. & De Freitas M.H. 1990: The complete shear stress – vs – shear displacement behaviour of clean and infilled rough joints. In: Barton, N. & Stephansson, O. (Hrsg.): Rock joints – Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen/Norway, 4-6 June 1990. Balkema, Rotterdam. 341-348.