

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
KLEINERE MITTEILUNGEN

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE
BULLETIN

Nr. 76

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse

**Interpretationsversuch des Scherverhaltens reiner
Tone auf Basis von Texturuntersuchungen**

von

Ursula Sonderegger

1985

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Bei natürlichen, tonhaltigen Böden sind Prognosen über das Scherverhalten aufgrund der wechselhaften mineralogischen Zusammensetzung schwierig, weshalb normalerweise erst Versuche zu zuverlässigen Ergebnissen führen. Um die Vorgänge besser erfassen zu können, wäre es aber wichtig abzuklären, wie sich eine Abscherung im Detail abspielt und welche Folgen sie auf die Einregelung der Tonmineralien hat. Frau U. Sonderegger konnte im Rahmen ihrer Dissertation an der ETH den Spezialfall reiner Kaolinite analysieren und kam dabei zum überraschenden Ergebnis, dass die Abscherung hier eine Entregelung der gesamten Probe bewirkte. Es handelt sich dabei nur um einen unter verschiedenen möglichen Typen von Verhalten von Tonmineralien, doch dürften diese konkreten Ergebnisse von allgemeinem Interesse sein, weshalb die Kommission gerne diesen Beitrag in die «Kleineren Mitteilungen» übernommen hat.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist die Verfasserin allein verantwortlich.

Zürich, März 1985

Für die Schweizerische
Geotechnische Kommission
Der Präsident:
C. Schindler

Erscheint gleichzeitig in
«*Eclogae geologicae Helvetiae*»
Vol. 78/1, 1985.

Eclogae geol. Helv.	Vol. 78	Nr. 1	Seiten 137–149	Basel, April 1985
---------------------	---------	-------	----------------	-------------------

Interpretationsversuch des Scherverhaltens reiner Tone auf Basis von Texturuntersuchungen¹⁾

Von URSULA SONDEREGGER²⁾

ABSTRACT

Data of 54 shearing experiments using pure clays have been plotted on diagrams of $\text{tg}\varphi$ (= shear stress/effective normal stress) versus shear displacement. The resulting shear curves can be divided into two types: Type A curves are characterized by a continuous increase in $\text{tg}\varphi$ up to a maximum value ($\text{tg}\varphi_{\text{max}}$) followed by a small decrease and then a constant value ($\text{tg}\varphi_{\text{rest}}$). All experiments with either pure kaolinite or illite showed this type of behavior. Type B curves also showed a continuous increase to a maximum value of $\text{tg}\varphi$ but then exhibited a significant decrease in $\text{tg}\varphi$ before achieving a constant value ($\text{tg}\varphi_{\text{rest}}$). This second type of behavior was found in experiments with Arizona montmorillonite.

Textural analysis of impregnated kaolinite samples was used to interpret the kaolinite shearing curves (Type A). Consolidated, *unsheared* clays showed a significant (001) orientation perpendicular to σ_1 . Consolidated, *sheared* kaolinite clays showed little orientation throughout the entire sample. This observation indicates that kaolinite clay particles have been disoriented during the course of the shearing experiment. Disorientation throughout the entire sample implies rotation of the kaolinite grains. If, however, one or more shear planes developed in the course of the experiment, the homogeneous deformation throughout the sample was terminated. For type B curves the following model is postulated. The decrease in $\text{tg}\varphi$ is related to the development of a grain-sliding mechanism or alternatively, an intracrystalline translation parallel to the (001) plane, which eventually lead to the development of a discrete shear plane.

The horizontal portion of the curve ($\text{tg}\varphi_{\text{rest}}$) indicates (for noncohesive material) a constant frictional resistance of a homogeneous deformation (Type A *without* shear plane). For type A curves *with* shear plane and type B curves, it indicates a constant frictional resistance on one or more discrete shear planes.

ZUSAMMENFASSUNG

Datenpunkte von 54 Scherversuchen an reinen Tonen wurden im Diagramm $\text{tg}\varphi$ (= Scherspannung/effektive Normalspannung) versus Scherweg dargestellt. Die resultierenden Scherkurven lassen sich in zwei Typen unterteilen: $\text{tg}\varphi$ zeigt beim Typ A einen stetigen Anstieg bis zum Erreichen eines Maximalwertes ($\text{tg}\varphi_{\text{Max}}$) und anschliessend, nach geringer Abnahme, einen konstanten Verlauf ($\text{tg}\varphi_{\text{Rest}}$). Diese Form der Scherkurve ergab sich bei allen Kaolinit- und Illitproben. Beim zweiten Kurventyp (= Typ B) ist $\text{tg}\varphi_{\text{Max}} \gg \text{tg}\varphi_{\text{Rest}}$, d.h., $\text{tg}\varphi$ zeigt eine deutliche Abnahme nach Erreichen des Maximums, dieser Kurventyp ergab sich bei Montmorillonit-Arizona-Proben.

Texturaufnahmen an imprägnierten Kaolinitproben lassen eine Interpretation der Kaolinit-scherkurven (Typ A) zu. Konsolidierte, *ungescherte* Proben zeigen eine deutliche (001)-Regelung senkrecht σ_1 . Konsolidierte, *gescherte* Kaolinitproben zeigen über die ganze Probe hinweg kaum eine Regelung. Diese Beobachtung wird dahingehend interpretiert, dass der Schervorgang die Kaolinitprobe entregelte. Die homogene Entregelung der Probe bedingt Rotation ganzer Kaolinitpartikel. Falls es zur Ausbildung einer oder von mehreren Scherebenen kommt, ist die homogene Deformation beendet. Für den Kurventyp B wird folgende Modellvorstellung postuliert: Die Abnahme von $\text{tg}\varphi$ wird durch das Wirksamwerden eines Korngleitmechanismus erklärt, entweder Translation

¹⁾ Vortrag gehalten am 6. Oktober 1984 im Rahmen der SGG, SNG Jahresversammlung.

²⁾ Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich. Gegenwärtige Adresse: Schweizerische Geotechnische Kommission, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

(*intrakristallin*) nach (001) oder *interkristallines* Korngleiten, was schliesslich zur Ausbildung einer diskreten Scherfläche führt.

Der horizontale Verlauf ($\text{tg}\varphi_{\text{Rest}}$) der Scherkurve entspricht für kohäsionsloses Material einem konstanten Reibungswiderstand einer homogenen Deformation (Typ A *ohne* Scherfläche). Für Kurventyp A *mit* Scherfläche und Kurventyp B entspricht der horizontale Verlauf der Scherkurve einem konstanten Reibungswiderstand an einer oder mehreren Scherflächen.

Scherversuche

Zur Bestimmung der Scherfestigkeit wurde das Tonmineralpulver mit Wasser vermischt und ungefähr bei Fließgrenze (Konsistenz wie Teig, Zahnpasta) in den GEO-NOR-Ringscherapparat (BISHOP et al. 1971) eingebaut, konsolidiert und geschert. Die Scherung der ringförmigen Probe (Fig. 1) wird durch Rotation der unteren Probenhälfte gegenüber der oberen Probenhälfte erzeugt. Der Scherweg wird über den mittleren Probenradius und den Rotationswinkel berechnet oder über die Zeit, da sich der Winkel zeitproportional verhält. Der innere und äussere Radius sind so gewählt, dass Unterschiede im Scherweg am inneren und äusseren Probenring vernachlässigt werden können.

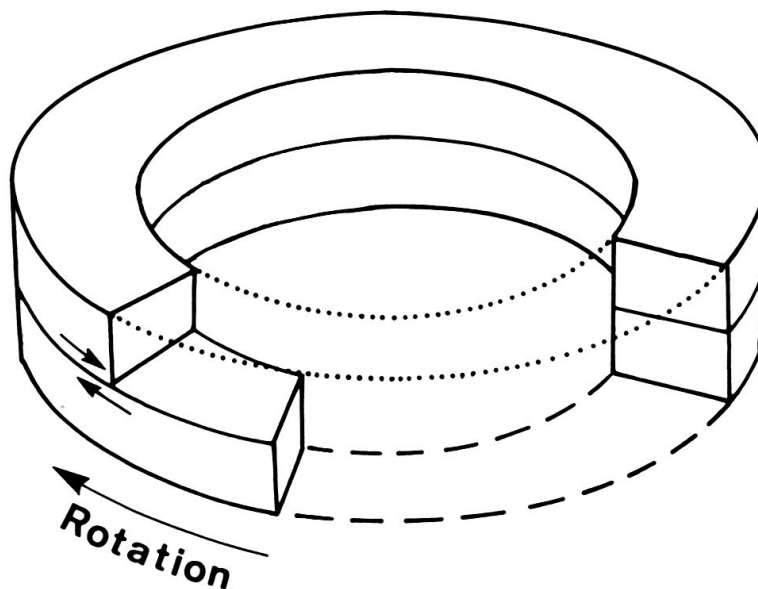


Fig. 1. Ringförmige Tonprobe.

Die Scherspannung (τ) wird durch das empirische Mohr-Coulombsche Bruchgesetz

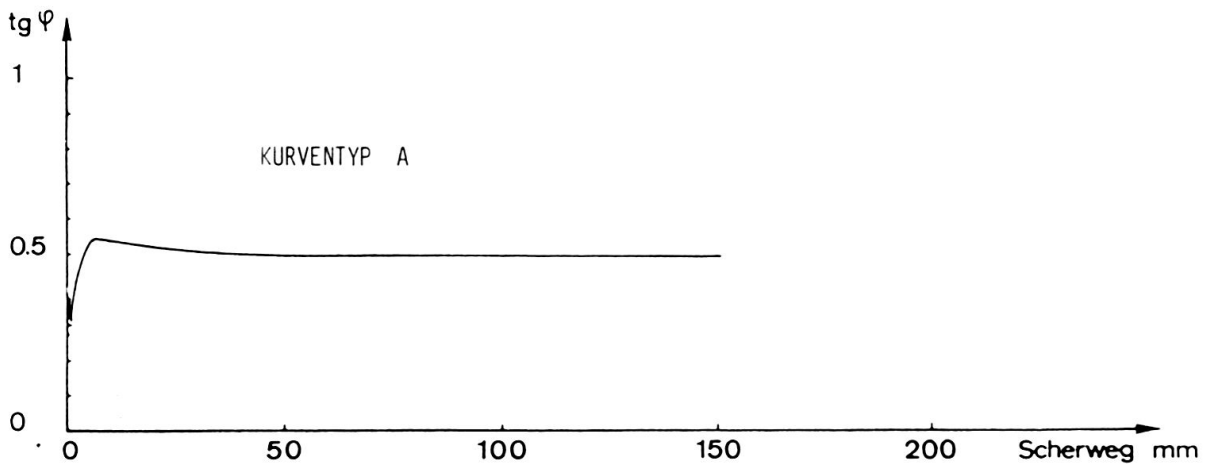
$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \text{tg}\varphi \quad (\text{aus: TERZAHGI 1954})$$

ausgedrückt (τ' = eff. Scherspannung, c' = eff. Kohäsion, σ' = eff. Normalspannung (etwa 1 kp/cm²), φ = Winkel der Scherfestigkeit, auch kurz Reibungswinkel genannt). Für eine vollständig dränierte, normalkonsolidierte Tonprobe gilt (da ohne eff. Kohäsion):

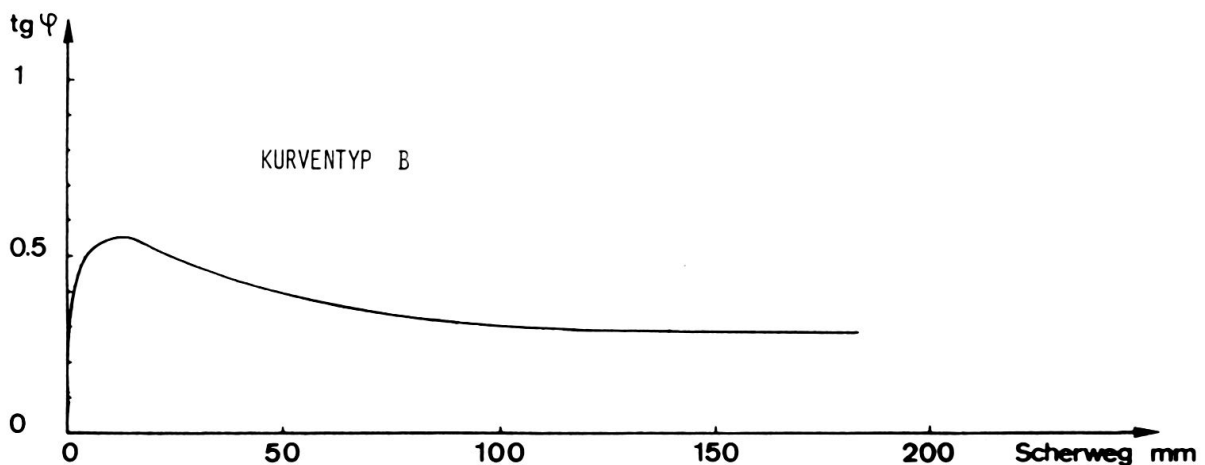
$$\text{tg}\varphi = \frac{\tau'}{\sigma'}. \quad (\text{LANG \& HUDER 1982})$$

Die Scherversuchsergebnisse sind in einem Diagramm $\operatorname{tg} \varphi$ versus Scherweg dargestellt (Fig. 2). Unsere Scherversuchsreihen zeigten zwei verschiedene Typen von Scherkurven (Fig. 2a,b). Der erste Typ, hier kurz als Typ A bezeichnet, zeigt einen stetigen Anstieg der Scherkurve bis zum Erreichen des Maximums (maximale Scherfestigkeit) und anschließend, nach geringem Abfall, einen konstanten Verlauf (Restscherfestigkeit). Dieser Typ der Scherkurve ergab sich bei allen Kaolinit- und Illitproben. Kurventyp B zeigt nach Erreichen des Maximums einen deutlichen Abfall der Scherkurve und anschließend einen konstanten Verlauf (Restscherfestigkeit). Diese Form der Scherkurve ergab sich bei Montmorillonit-Arizona-Proben.

Makroskopisch war folgender Unterschied zu beobachten: Bei Proben des Kurventyps B war die Scherfläche derart schön ausgebildet, dass sich ein ganzer, oberer, abge-



Ⓐ KAOLINIT-SCHERKURVE (KAOLINIT KGA-1 WELL, Ca^{++} -FORM)
GLEICHER SCHERKURVENTYP WIRD MIT ILLIT-PROBEN ERZIELT



Ⓑ MONTMORILLONIT-SCHERKURVE (MONTMORILLONIT ARIZONA, SAZ-1, K^{+} -FORM)

Fig. 2. Scherkurventypen A und B.

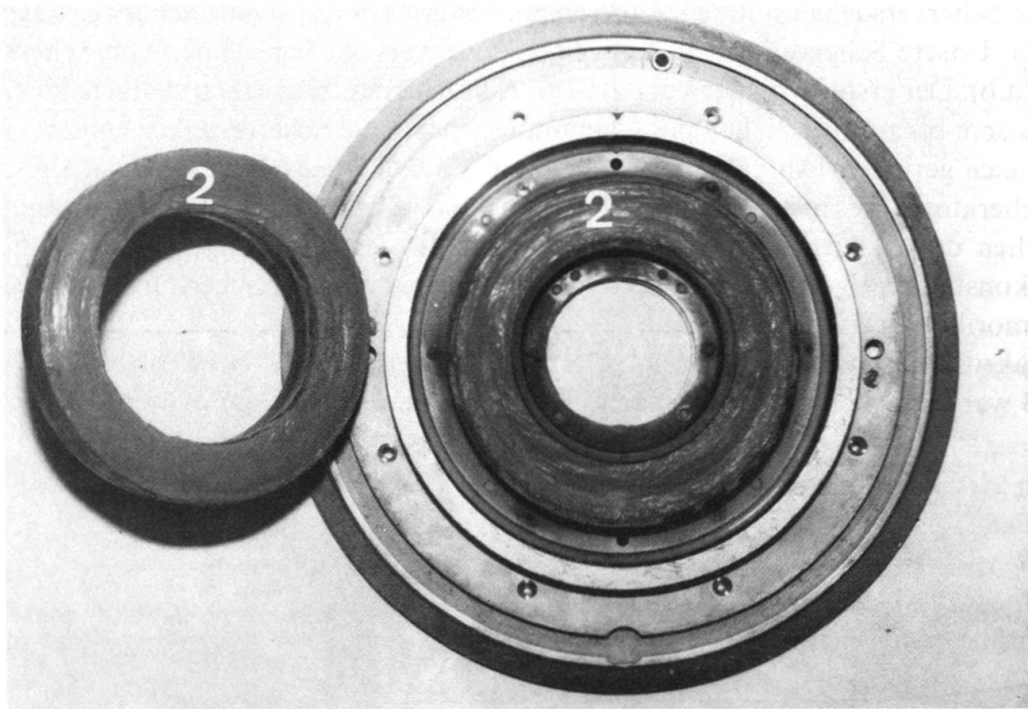


Fig. 3. Gescherte Montmorillonit-Probe (SAz-1, Li^+), diskrete Scherfläche (2) sichtbar.

schserter Probenring abheben liess (Fig. 3); dies im Gegensatz zu Proben des Kurventyps A.

Texturaufnahmen an Kaolinitproben (Kurventyp A)

Es interessiert hier weniger die Scherfestigkeit an und für sich und die sie beeinflussenden Faktoren, sondern *die Teilchenbewegung der Tonpartikel, welche während des Scher-*

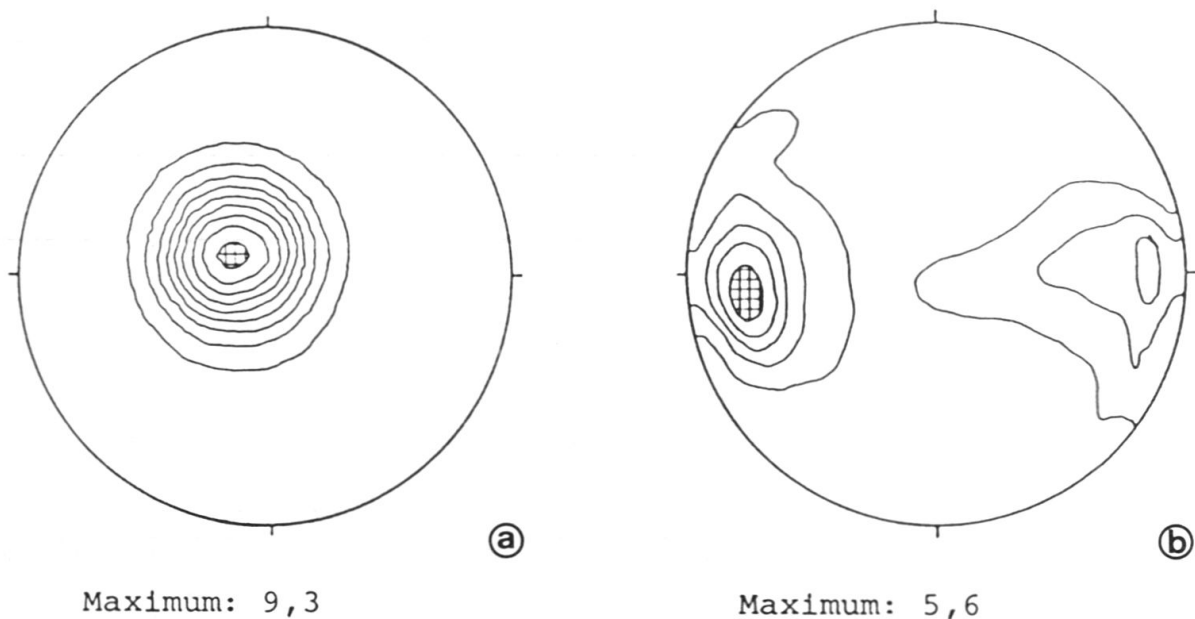


Fig. 4. Polfiguren konsolidierter (1 kp/cm^2) Kaolinitproben (China Clay, Ca^{++}) (Maxima in Vielfachen der uniformen Verteilung). a: senkrecht σ_1 , b: parallel σ_1 .

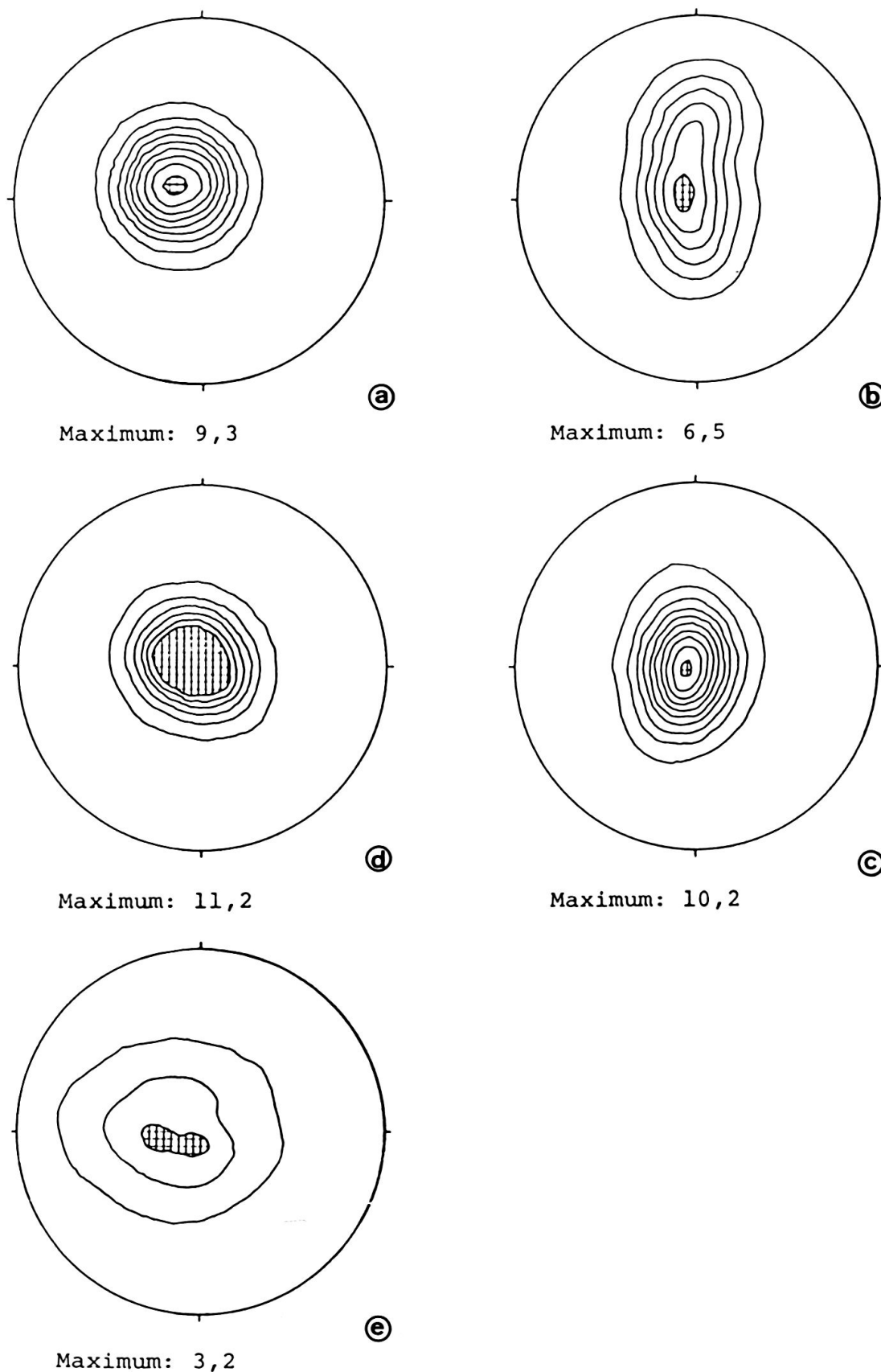


Fig. 5. Polfiguren konsolidierter (1 kp/cm^2) Kaolinitproben senkrecht σ_1 (Maxima in Vielfachen der uniformen Verteilung). a: China Clay, Ca^{++} , carbowachsimprägniert, b: China Clay, carbowachsimprägniert, c: China Clay, kunststoffimprägniert, d: CCCQ30, kunststoffimprägniert (70 Trockengew.-% China Clay Ca^{++} + 30 Trockengew.-% Quarz $< 63 \mu\text{m}$), e: KGa-1 well, Ca^{++} , kunststoffimprägniert.

vorganges erfolgen. Naheliegend waren Untersuchungen mit dem Texturgoniometer. Es stellte sich das Problem der Probenimprägnierung. Es musste ein Imprägnierungsmittel gefunden werden, welches das Wasser in der feuchten Tonprobe ersetzen kann. Verschiedene Methoden wurden ausprobiert. Am besten gelang eine Kunststoffimprägnierung (SONDEREGGER in Vorb.), teilweise konnten auch carbowachsimprägnierte Proben (MITCHELL 1956; MARTIN 1966, 1973) für Texturaufnahmen verwendet werden. Die Imprägnierung ist nur an Kaolinitproben (= Kurventyp A) gelungen.

Die imprägnierten Tonproben wurden mit einem computergesteuerten «Seifert-Scintag PAD II»-Texturgoniometer (Institut für Geologie, ETH Zürich) untersucht. Es wurden von allen Proben Reflexionsaufnahmen gemacht (2 Theta (002)-Kaolinit = 29° bei Kobaltstrahlung). Die gemessenen Intensitäten wurden in Polfiguren umgerechnet und konturiert. Diese Polfiguren stellen den Einregelungsgrad der (001)-Flächen von Kaolinit dar, und zwar als Vielfache einer uniformen Verteilung.

Die Kaolinitproben wurden vor und nach dem Schervorgang imprägniert, um die Orientierung der Tonpartikel nach der Konsolidationsphase sowie den Einfluss des Schervorganges auf die Orientierung zu erfassen.

Um sicherzugehen, dass die gemessene Orientierung nicht durch die Präparation der imprägnierten Proben erzeugt wurde, wurde eine mit Carbowachs imprägnierte Probe senkrecht zur Belastungsebene (parallel σ_1) geschnitten. Figur 4b zeigt die Polfigur dieser Probe. Aus den Figuren 4a und 4b kann geschlossen werden, dass durch die Präparation der Proben keine wesentliche Umorientierung erfolgte.

Die Polfiguren konsolidierter Proben (Fig. 5) zeigen eine deutliche Einregelung von (001)-Kaolinit senkrecht σ_1 . Zunehmende Auflast bei der Konsolidation entspricht zunehmender Orientierung (Fig. 6).

Die Texturen der Proben CCCQ30 (70 Trockengew.-% Kaolinit China Clay Ca-Form + 30 Trockengew.-% Quarz < 63 μm) und KGa-1 well (Kaolinit KGa-1 well

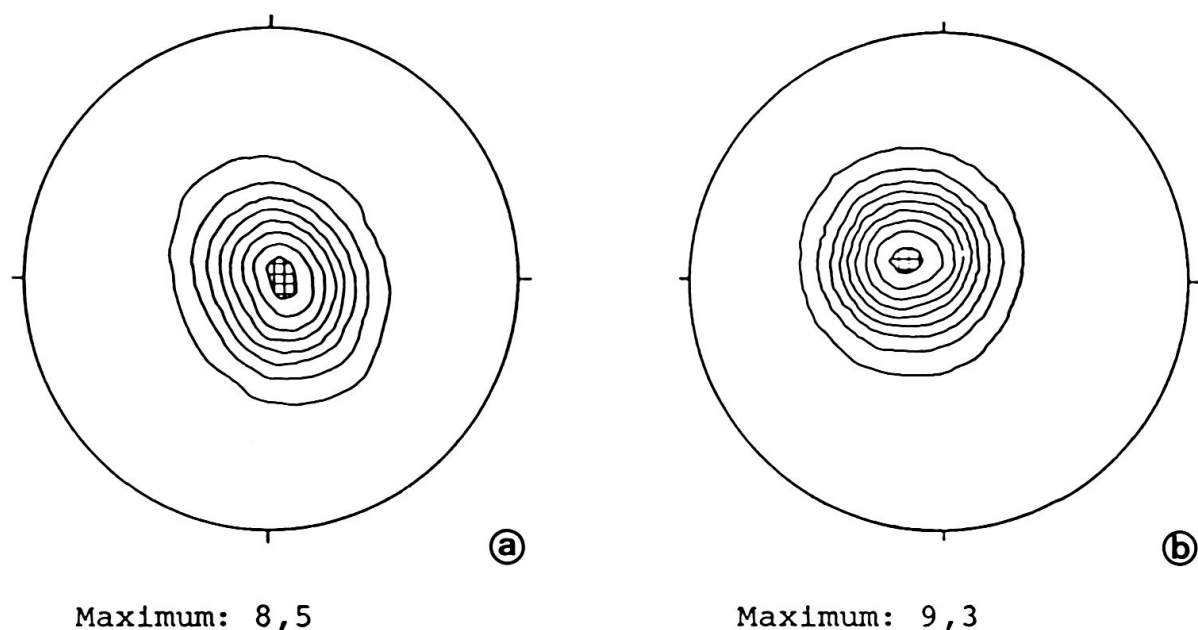
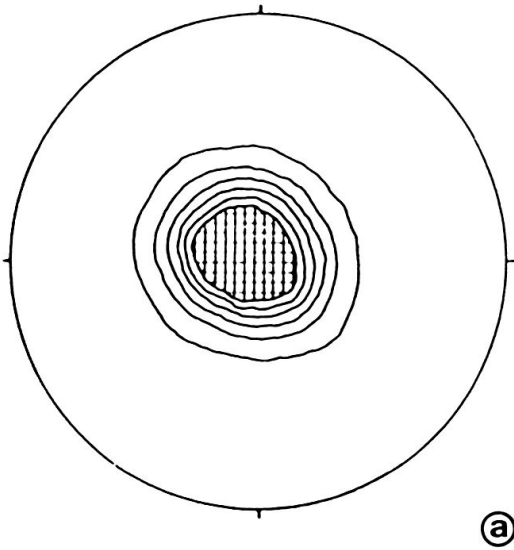
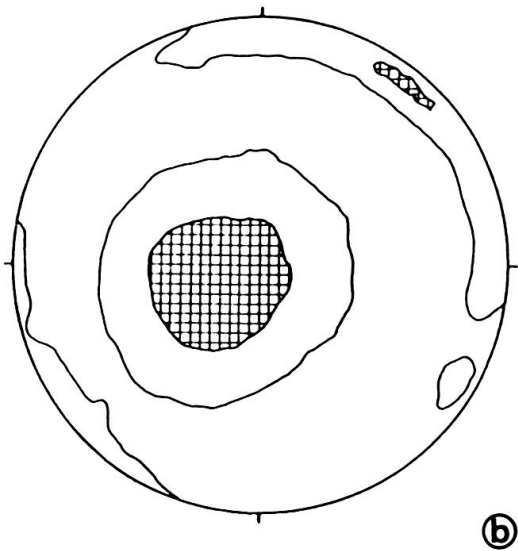


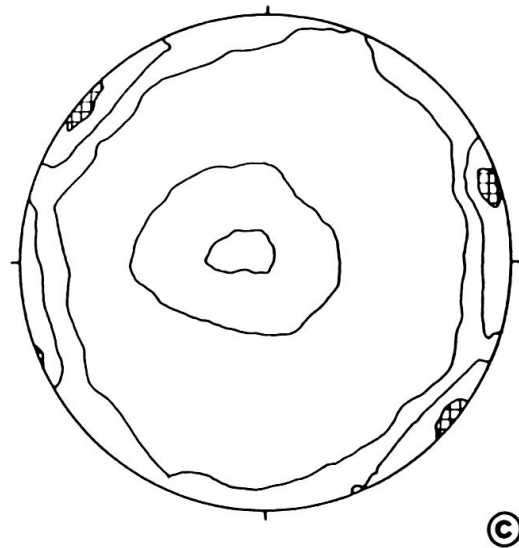
Fig. 6. Polfiguren konsolidierter Kaolinitproben (China Clay Ca^{++}) senkrecht σ_1 (Maxima in Vielfachen der uniformen Verteilung). a: 0,5 kp/cm^2 , b: 1,0 kp/cm^2 .



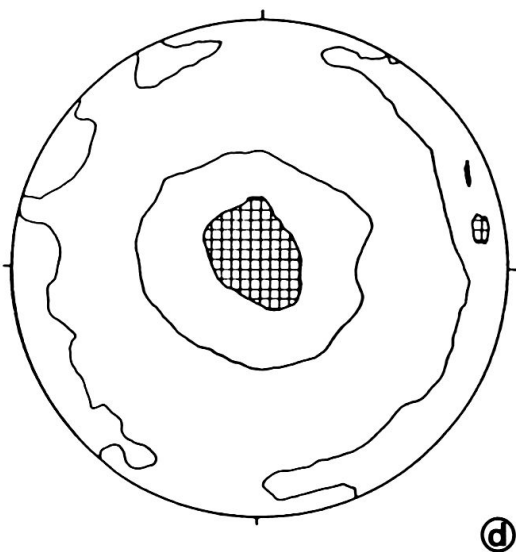
Maximum: 11,2



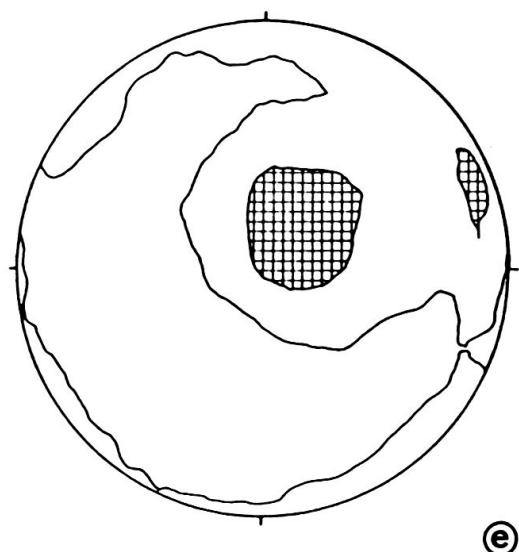
Maximum: 2,9



Maximum: 3,4



Maximum: 2,7



Maximum: 2,5

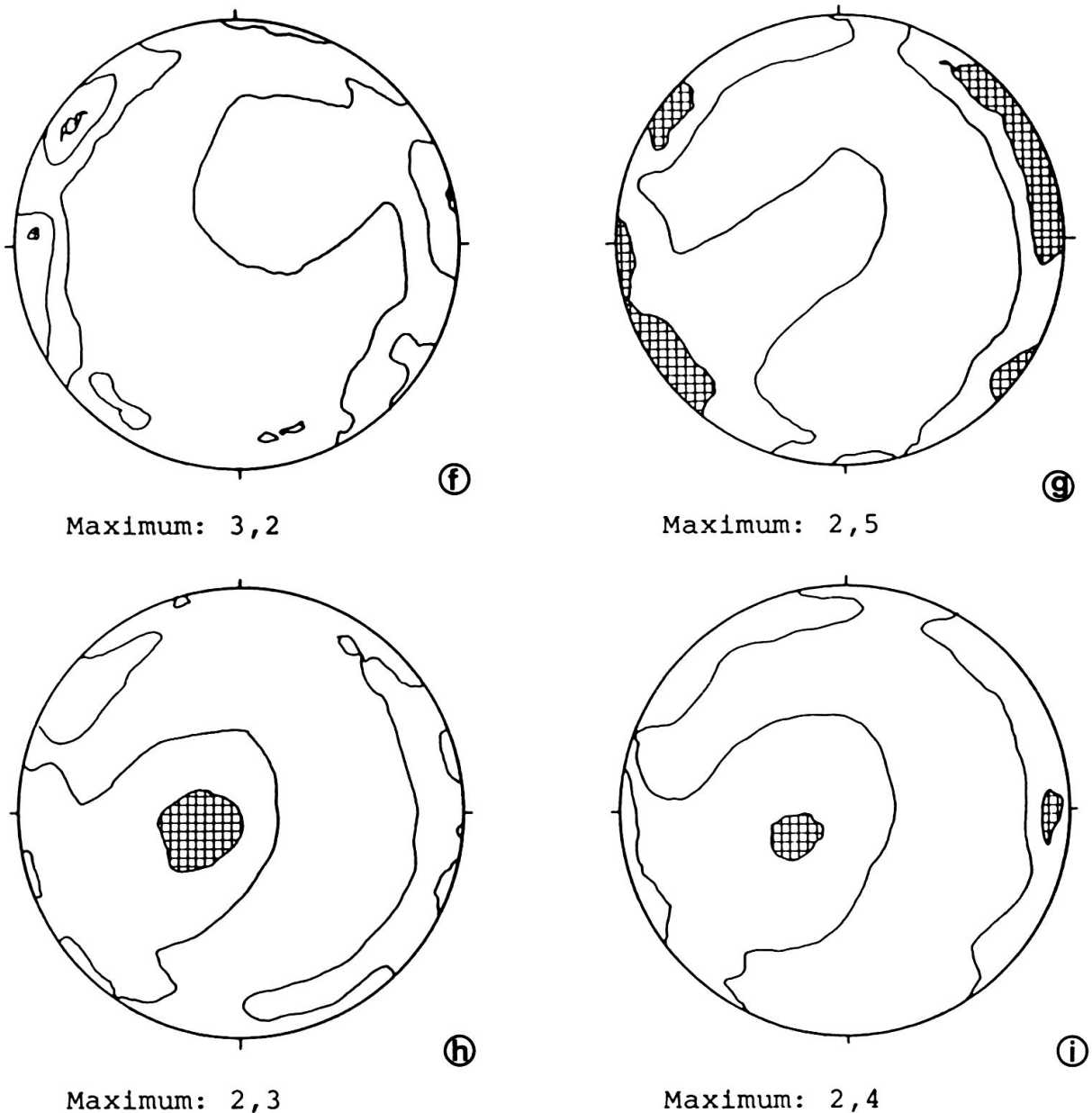
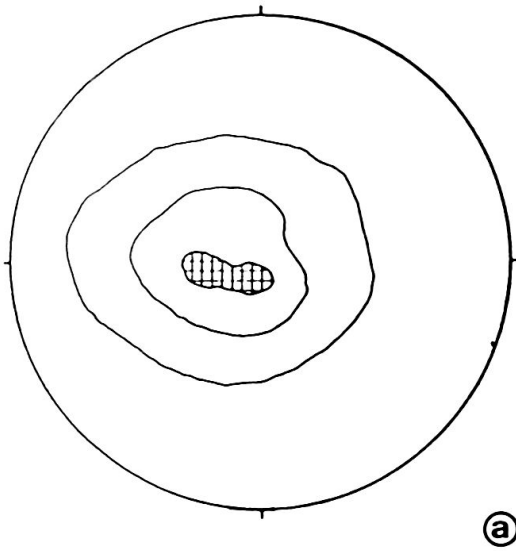


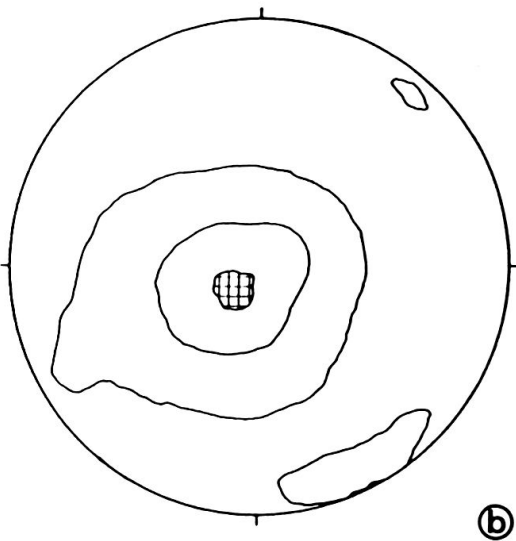
Fig. 7. a: 1-kp/cm²-konsolidierte Kaolinit-Quarz-Probe (CCCQ30 = 70 Trockengew.-% China Clay Ca⁺⁺ + 30 Trockengew.-% Quarz < 63 µm). b-i: Profil durch die gescherte CCCQ30-Probe (Maxima in Vielfachen der uniformen Verteilung).

Ca-Form) wurden auch *nach dem Schervorgang* untersucht. Für diese gescherten Proben wurde Kunststoffimprägnierung angewandt.

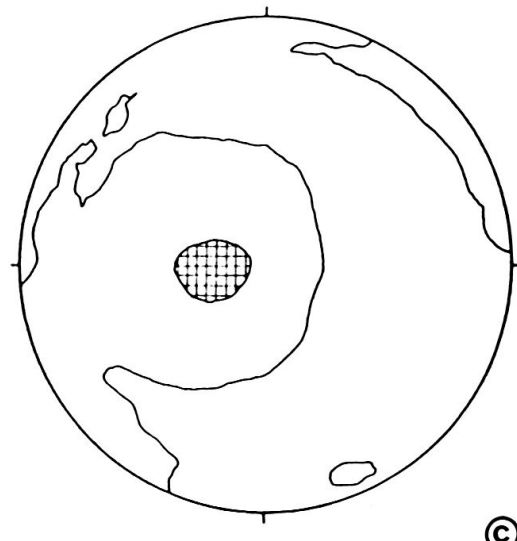
Die Polfigur Figur 7a entspricht der konsolidierten, *ungescherten*, kunststoffimprägnierten Probe CCCQ30 (70% China Clay, Ca⁺⁺-Form + 30% Quarz < 63 µm gebrochen, bezogen auf das Trockengewicht), die Polfiguren 7b bis 7i entsprechen sukzessiven Schnitten durch die *gescherte* Probe (Kurventyp A) von oben nach unten. Während die konsolidierte, *ungescherte* Probe eine sehr gute (11.2*uniform) Regelung von (001)-Kaolinit senkrecht σ_1 (Konsolidation) aufweist, ist die Regelung in sämtlichen Schnitten der *gescherten* Probe nur gering (2.5 bis 3.4*uniform).



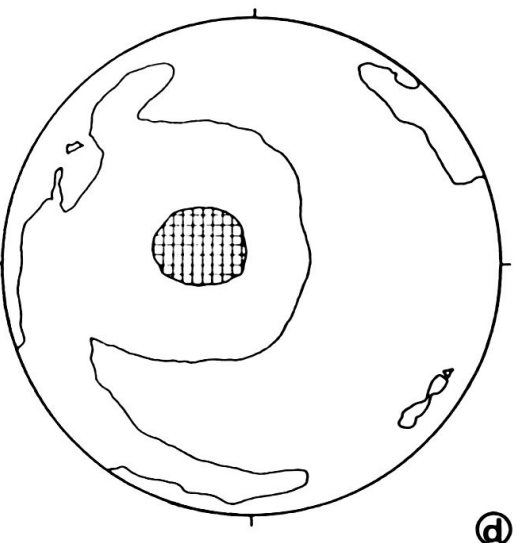
Maximum: 3,2



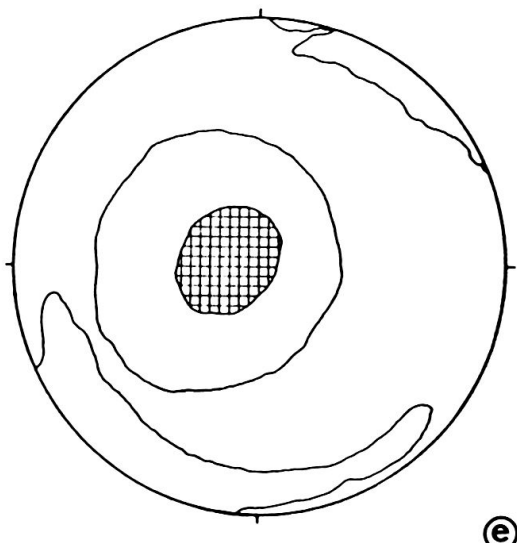
Maximum: 3,2



Maximum: 2,2



Maximum: 2,4



Maximum: 2,5

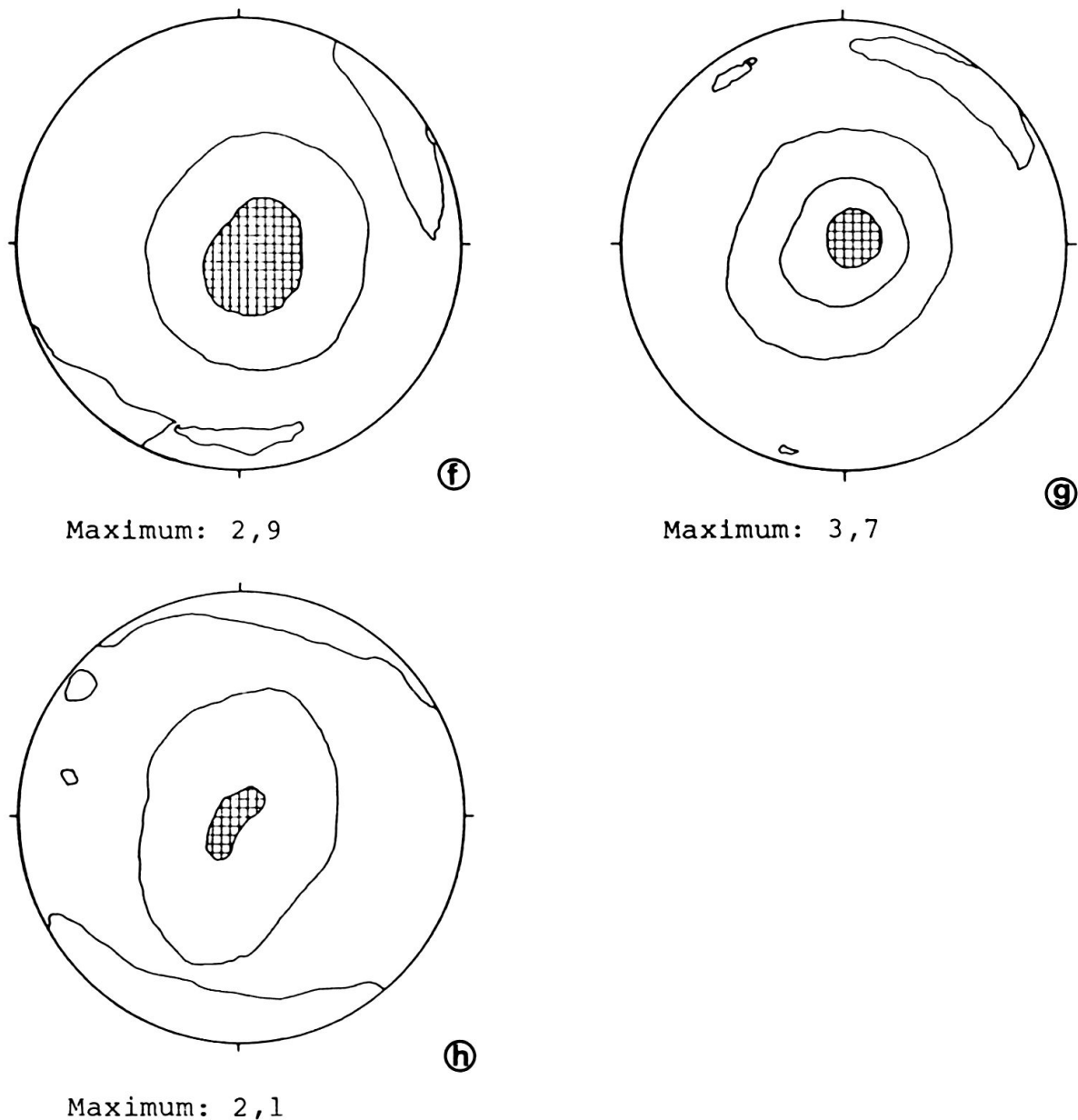


Fig. 8. a: 1-kp/cm²-konsolidierte Kaolinitprobe (KGa-1 well, Ca⁺⁺). b-h: Profil durch die gescherte KGa-1-well-Probe (Maxima in Vielfachen der uniformen Verteilung).

Figur 8 zeigt die Polfiguren der Kaolinitprobe KGa-1 well, Ca⁺⁺-Form, Figur 8a die 1-kp/cm²-konsolidierte Probe; Figur 8b bis 8h horizontale Schnitte durch die gescherte Probe (Kurventyp A) von oben nach unten.

Diskussion der Texturaufnahmen an Kaolinitproben

Die Figur 5 beweist, dass Kaolinitproben vor dem Schervorgang eine bevorzugte Orientierung von (001)-Kaolinit senkrecht σ_1 aufweisen.

Die konsolidierte, *ungescherte* CCCQ30-Probe (Fig. 7a) zeigt eine sehr gute Regelung von (001)-Kaolinit (11.2*uniform) senkrecht zu σ_1 (Konsolidation), während die Rege-

lung in sämtlichen Schnitten der *gescherten* Probe (Fig. 7b–i) nur gering (2.5 bis 3.4*uniform) ist. Dieses überraschende Ergebnis muss dahingehend interpretiert werden, dass der Schervorgang die Probe entregelte. Diese Entregelung erfolgte nicht nur an diskreten Ebenen, sondern *homogen über die ganze Probe hinweg*. Die Entregelung kann nur durch Rotation ganzer Tonpartikel während der Deformation der Probe erfolgt sein. Diese Texturaufnahmen der Probe CCCQ30 beweisen, dass zumindest für einen Teil des Scherversuches eine homogene Deformation der Probe stattgefunden haben muss. Falls es zur Ausbildung einer Scherebene kommt (bei Kaolinitproben nicht immer nachweisbar), so ist die homogene Deformation der Probe beendet. In erster Näherung liegt es nahe, den Schervorgang bis zum Maximum als homogene Deformation mit Entregelung der Tonpartikel aufzufassen. Der horizontale Verlauf der Scherkurve entspricht einem konstanten Reibungswiderstand, auch an einer oder mehreren Scherflächen, falls vorhanden.

Da die (001)-Regelung der ungescherten, aber konsolidierten KGa-1-well- Ca^{+2} -Probe (Fig. 8a) wesentlich geringer ist als die der China-Clay-Quarz-Probe (CCCQ30) (Fig. 7a), kann nicht in gleichem Masse wie bei der China-Clay-Quarz-Probe eine *Entregelung* stattfinden. Es ist aber auch keine *Einregelung* durch den Schervorgang zu beobachten.

Da durch die homogene Verformung der Probe keine Einregelung stattfand, muss auch in dieser KGa-1-well-Probe eine stetige Teilchenrotation bei der Deformation stattgefunden haben.

Allgemeine Interpretation der Charakteristika der Scherkurven

Aus unseren Gefügeuntersuchungen an Kaolinitproben (Fig. 7) ergab sich für Beispiele des Kurventyps A (Fig. 2a) eine Entregelung durch den Schervorgang. Der stetige Anstieg der Scherkurve wird als homogene Deformation mit zunehmender Entregelungs-

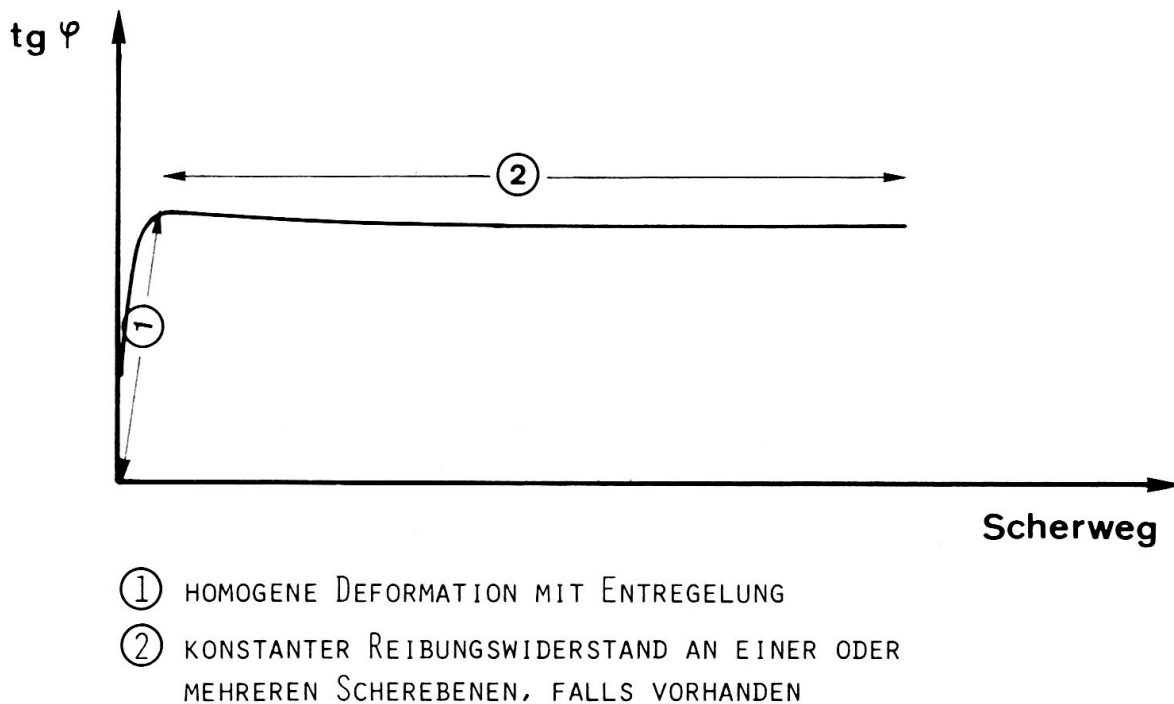


Fig. 9. Homogene Deformation und konstanter Reibungswiderstand. Weitere Erläuterungen im Text.

arbeit interpretiert. Der flache Teil der Scherkurve wird als konstanter Reibungswiderstand interpretiert (Fig. 9).

Im Falle von Kurventyp B konnten keine Texturaufnahmen durchgeführt werden. Unsere Interpretation stützt sich somit nur auf die Scherkurven und auf Analogie mit Deformationsexperimenten an anderen Gesteinen. Der Abfall der Scherfestigkeit des Kurventyps B kann durch das Wirksamwerden eines Korngleitmechanismus – in unseren Beispielen Translation nach (001) oder interkristallines Korngleiten (grain sliding, PATERSON 1978, S. 175) – erklärt werden. Durch zunehmende Einregelung von (001) der Tonpartikel in die Scherfläche kann entweder deren Translationsmechanismus ($T = (001)$) wirksam werden, oder ganze Partikel gleiten parallel zu (001) (Korngleiten). Der horizontale Verlauf der Scherkurve entspricht wiederum einem konstanten Reibungswiderstand oder einem Translationswiderstand, beides meist im Bereich einer diskreten Scherebene. Die Interpretation des Scherabfalls als Folge von Elementarschichtgleiten durch MÜLLER-VONMOOS et al. (1981) entspricht der ersten der beiden hier dargestellten Erklärungen.

Der Übergang von Kurventyp A zu Kurventyp B entspricht dem Übergang von Rotation ganzer Tonpartikel zu Kristalltranslation oder Korngleiten. Welcher Mechanismus betätigt wird, hängt vom Widerstand für Durchbewegung der Tonprobe bzw. vom Translations- bzw. vom Korngleitwiderstand ab. In Figur 10 sind diese Verhältnisse schematisch dargestellt. Jede Teilfigur bezieht sich auf eine Probe. Im Beispiel 10a ist der Translationswiderstand oder der Korngleitwiderstand der Partikel grösser (gestrichelte Kurve) als derjenige für Durchbewegung der Probe mit Teilchenrotation; somit kann es nicht zur Translation in den Tonteilchen oder zum Korngleiten kommen. Im Beispiel 10b ist es genau umgekehrt, und Translation nach (001) bzw. Korngleiten ist der dominie-

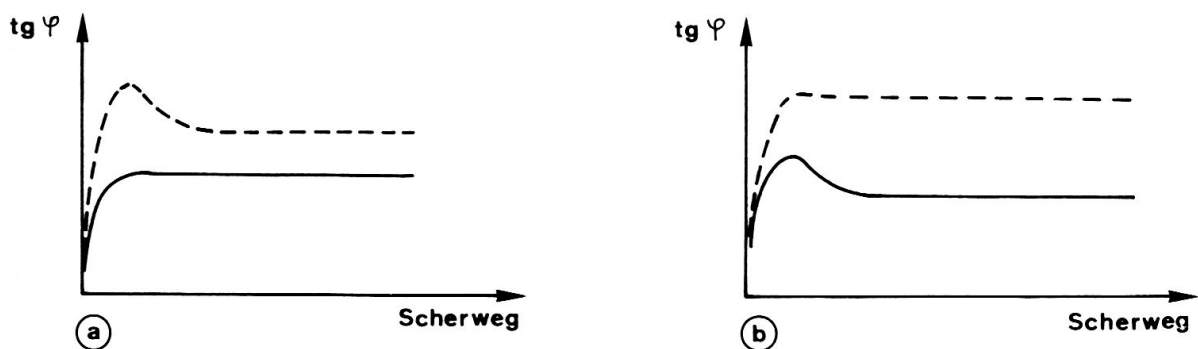


Fig. 10. Stabile (ausgezogene) und metastabile (gestrichelte) Scherkurven (siehe Text).

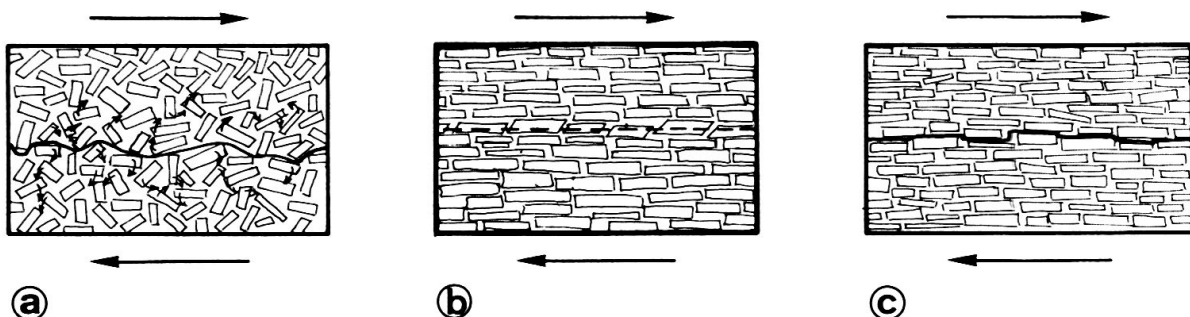


Fig. 11. Schematische Darstellung der Teilchenbewegung während des Schervorganges.

rende Mechanismus. Damit wird auch die Ausbildung einer Scherebene durch die Probe gefördert. Figur 11 zeigt skizzenhaft unsere Modellvorstellung der Partikelbewegung. Im Falle a rotieren die Partikel, und eine Scherebene müsste sie «umfliessen», im Falle b findet Translation in den Partikeln statt, und die Scherebene geht durch sie hindurch, im Falle c findet Korngleiten (ohne Rotation) statt. Die Mechanismen b und c sind nicht ohne weiters unterscheidbar.

Unser Modell ist durch Texturaufnahmen an Kaolinit für den Fall a (Scherkurventyp A) belegt. Für unsere Modellvorstellung Fall b und c sprechen die andere Charakteristik der Scherkurve Typ B und die Tatsache, dass sich immer eine beobachtbare Scherebene bildet.

Verdankungen

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer von Prof. Dr. M. Müller-Vonmoos und Prof. H. J. Lang angeregten Dissertation. Für die Hilfe bei der Probenimprägnierung danke ich Herrn Dr. M. Müller (Institut für Allgemeine Botanik). Besonderer Dank gilt den Herren Dr. St. Schmid, Dr. N. Mancktelow und Prof. Dr. J. Ramsay für ihre Anregung, Kritik und Review der Arbeit. Die Finanzierung der Arbeit erfolgte aus Projektmitteln der ETH und des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, wofür ich ebenfalls danke.

LITERATURVERZEICHNIS

- BISHOP, A. W., GREEN, G. E., GARGA, V. K., ANDRESEN, A., & BROWN, J. D. (1971): A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength. – *Géotechnique* 21/4, 273–328.
- LANG, H.-J., & HUDER, J. (1982): *Bodenmechanik und Grundbau*. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- MARTIN, R. T. (1966): Quantitative Fabric of Wet Kaolinite. – *Clays and Clay Miner.* 14, 271–288.
- (1973): Fabric of Kaolinite in Direct Shear Tests. – U. S. Waterways Exp. Sta., Contract Rep. No. 3–101.
- MITCHELL, J. K. (1956): The Fabric of Natural Clays and its Relations to Engineering Properties. – *H. R. B. Proc.* 35.
- MÜLLER-VONMOOS, M., HONOLD, P., & KAHR, G. (1981): Das Scherverhalten von reinen Tonen. – J 293/1, Interner Ber. Inst. Grundbau u. Bodenmech., ETH Zürich.
- PATERSON, M. S. (1978): Experimental Rock Deformation, The Brittle Field. – *Miner. and Rocks* 13.
- TERZAGHI, K. (1954): *Theoretische Bodenmechanik* (übersetzt und bearb. nach der 5. Aufl. von R. Jelinek). – Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Manuskript eingegangen am 11. Dezember 1984,
angenommen am 20. Dezember 1984.

