

## QUANTITATIVER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DEM TONGEHALT UND DER SCHERFESTIGKEIT VON TON- ZWISCHENSCHICHTEN

### Quantitative Correlation between Clay Fraction and Shear Strength of Weak Intercalations

W. XIANG

Department of Hydrogeology and Engineering Geology,  
China University of Geoscience,  
Wuhan, P.R. China

#### KURZFASSUNG

Der Zusammenhang zwischen dem Tongehalt und der Scherfestigkeit von Tonzwischenschichten wird quantitativ erfaßt und durch eine mathematische Formel ausgedrückt.

Desweiteren wird der Mechanismus dieses Zusammenhangs mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufgezeigt. Als Ursache dieses Zusammenhangs sind unterschiedliche Mikrogefüge bei verschiedenen Tongehalten anzusehen.

#### ABSTRACT

The correlation between clay fraction and shear strength of weak intercalations is expressed by a mathematical formula.

Furthermore the mechanism of the connection is showed by means of a Rasterelectron microscope (REM). The author considers that the cause of the correlation is different microstructures by varied clay fractions.

Tab. 1: Atterberg-Grenzen und Scherparameter ausgewählter Tonproben, geordnet nach dem Tongehalt (TG)

TG	Pr.Nr.	W(%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	IP	$\varphi(^{\circ})$	c(kg/cm <sup>2</sup> )
74	132	36.0	---	---	---	10.7	0.15
65	130	24.5	38.5	20.2	18.3	11.2	0.14
60	131	34.0	37.0	20.0	17.0	11.9	0.05
60	131	34.0	37.0	20.0	17.0	12.4	0.20
58	116	26.3	36.5	18.9	17.6	13.0	0.20
56	202	25.0	33.0	17.0	16.0	14.6	0.07
53	130	22.7	32.2	16.8	15.4	13.5	0.12
52	202	24.9	31.0	16.0	15.0	13.5	0.21
50	130	25.2	37.3	20.2	17.1	15.5	0.24
48	130	23.9	35.8	20.0	15.8	16.4	0.12
48	230	19.3	41.0	18.0	23.0	14.5	0.09
47	218	22.5	39.8	17.3	22.5	15.4	0.10
43	130	25.4	33.2	17.2	16.0	18.0	0.14
43	130	30.3	31.6	15.2	16.4	17.5	0.16
41	219	22.1	35.0	15.0	20.0	17.5	0.30
40	115	23.5	29.3	17.4	11.9	18.3	0.06
38	230	19.3	35.0	17.0	18.0	17.5	0.35
26	212	21.0	---	---	---	19.3	0.35
26	115	20.3	29.3	18.2	11.0	19.0	0.36

TG = Tongehalt (%) (>0.005 mm); Pr.Nr. = Tonzwischenschicht-Nr.; W(%) = natürlicher Wassergehalt; W<sub>L</sub>(%) = Fließgrenze; W<sub>P</sub>(%) = Ausrollgrenze; IP = Plastizitätszahl;  $\varphi(^{\circ})$ , c(kg/cm<sup>2</sup>) = Scherparameter

Die tonmineralogischen Untersuchungen ergaben folgende Zusammensetzung: 40-68 Gew.-% Illit, 10-39 Gew.-% Montmorillonit, 13-22 Gew.-% Chlorit und < 5 Gew.-% Kaolinit.

Es handelt sich also um einen gemischten Typ. In Tab. 2 sind die wesentlichen Daten der chemischen Vollanalyse aufgeführt.

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Proben

SiO <sub>2</sub>	50-56 Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7-9 Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20-25 Gew.-%
MgO	4-5 Gew.-%
K <sub>2</sub> O	1-5 Gew.-%
Karbonat	4-11 Gew.-%
leichtlösliche Salze, Sulfat und organischer Anteil	bis zu 0.5 Gew.-%

Da die tonmineralogische und chemische Zusammensetzung der Tonzwischenschichten ähnlich ist, kann dieser Faktor nur einen unbedeutenden Einfluß auf die Scherfestigkeit von Tonzwischenschichten besitzen. In diesem Fall kommt dem Tongehalt der Tonzwischenschichten eine wesentliche Bedeutung zu. Beachtenswert ist, daß verschiedene Proben aus derselben Tonzwischenschicht sehr unterschiedliche Tongehalte aufweisen, z.B. einen Tongehalt von 30-65 Gew.-% bei der Tonzwischenschicht 130. Es konnte ein wesentlicher Zusammenhang nachgewiesen werden: je höher die Tongehalte der Tonzwischenschichten sind, desto niedriger ist die Scherfestigkeit. Tongehalt und Scherfestigkeit lassen sich gut miteinander korrelieren (Abb. 2).

Aus der Korrelationskurve ist ersichtlich, daß die Scherfestigkeit der Tonzwischenschichten mit zunehmendem Tongehalt herabgesetzt wird. Die Kurve kann in drei Abschnitte unterteilt werden:

Bei Tongehalten von 25-40 Gew.-% kommt es zu einer langsamen Herabsetzung der Scherfestigkeit, bei Tongehalten von 40-60 Gew.-% nimmt die Scherfestigkeit deutlich ab, und bei höheren Tongehalten wird die Scherfestigkeit nur noch unwesentlich niedriger. A.W. SKEMPTON (1985) hat eine ähnliche Verteilungskurve entwickelt (Abb. 3).

## 1. PROBLEMSTELLUNG

Die Scherfestigkeit von Tonen ist von vielen Faktoren abhängig wie z. B. der Tonmineralzusammensetzung, dem Tongehalt, der chemischen Zusammensetzung, der Zeit, dem Wassergehalt, der Belastungsgeschwindigkeit, dem Spannungszustand, der Mächtigkeit und der Form der Bruchfläche. Bis heute wurden zahlreiche Arbeiten durchgeführt, die den Einfluß der unterschiedlichen Faktoren auf die Scherfestigkeit näher untersuchen. An dieser Stelle sei vor allem auf folgende Arbeiten hingewiesen: A.W. SKEMPTON, 1964, 1985; T.C. KENNEY, 1967; B. VOIGHT, 1973; M.A. KANJI, 1974; R.D. LAMA, 1978; K. CZURDA, 1978; W. XIANG, 1984, 1985; G. MESRI, 1986; S. GIBO, 1987.

Oftmals sind jedoch in einem bestimmten Gebiet der Tonmineraltyp und die chemische Zusammensetzung der Tone sehr ähnlich, so daß sich die Zahl der Einflußgrößen um diese beiden wesentlichen Faktoren verringert. Meist liegt hierbei als Tonmineraltyp ein sogenannter "Mischtyp" vor, bei dem ein Tonmineral wie z.B. Illit oder Montmorillonit vorherrschend ist. Der Tongehalt (Feinkornanteil  $< 0.002$  mm) der Tone oder Tonzwischenschichten hingegen variiert oftmals in weiten Grenzen, da während der Sedimentation die Wasserströmung unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten unterliegt. Eine Tonzwischenschicht kann im Abstand von wenigen Metern deutlich unterschiedliche Tongehalte aufweisen. Daher hat der Tongehalt einen großen Einfluß auf die Scherfestigkeit der Tone bzw. der Tonzwischenschichten, unter der Voraussetzung, daß die Tonmineralzusammensetzung und die Versuchsbedingungen ähnlich sind.

Dieser Vortrag legt den Schwerpunkt auf den quantitativen Zusammenhang zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit von Tonzwischenschichten und dessen Mechanismus.

## 2. BEWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Die Proben der Tonzwischenschichten stammen aus einem Red Bed-Gebiet in China. Es wurden zahlreiche Versuche zur Bestimmung des Wassergehalts, der Dichte, des Raumgewichts, der Korngrößenverteilung, der Tonmineralzusammensetzung, der chemischen Zusammensetzung und der Scherparameter durchgeführt. Hierbei wurden Direkt-Scherversuche an ungestörten Proben vorgenommen (Tab. 1).

Der natürliche Wassergehalt der Proben liegt bei 19-26 Gew.-% und damit höher als der Wassergehalt bei der Ausrollgrenze (15-20 Gew.-%) und niedriger als der Wassergehalt bei der Fließgrenze (29-40 Gew.-%). Die Plastizitätszahl variiert zwischen 11 und 20. Im Plastizitätsdiagramm (Abb. 1) liegen alle Werte oberhalb der A-Linie im Bereich der leicht- bis mittelplastischen Tone.

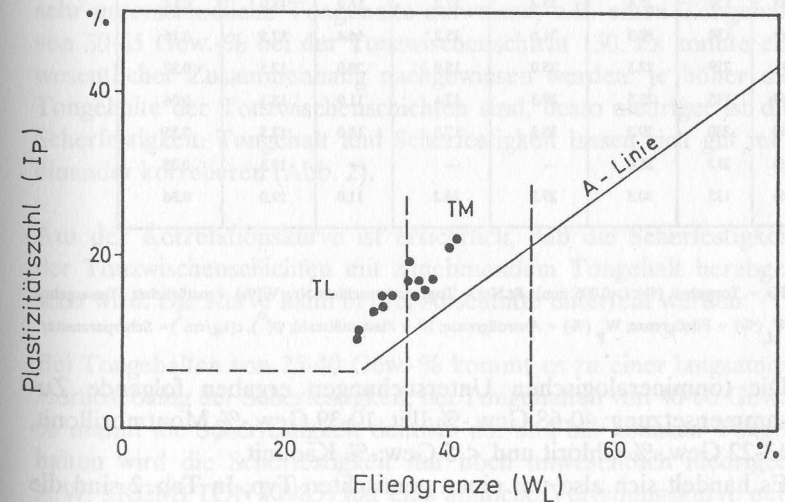


Abb. 1: Plastizitätsdiagramm

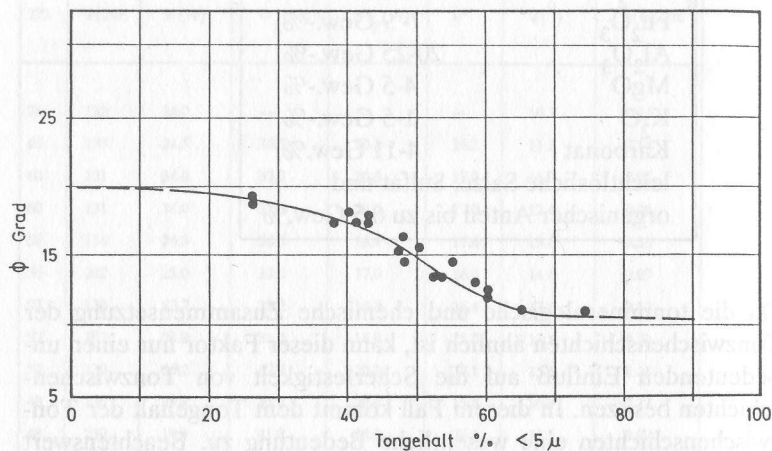
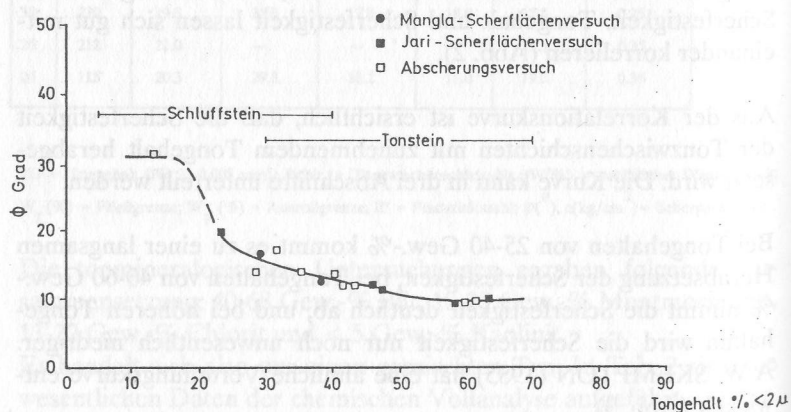


Abb. 2: Korrelationskurve zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit

Abb. 3: Korrelationskurve zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit  
(nach A.W. SKEMPTON, 1985)

### 3. KORRELATIONSGLEICHUNG ZWISCHEN TONGEHALT UND SCHERFESTIGKEIT

Obleich man schon seit längerer Zeit den Einfluß des Tongehalts auf die Scherfestigkeit von Tonen kennt, konnte dieser Zusammenhang bisher nicht quantifiziert werden. Zur Lösung dieses Problems wurden daher von mir zahlreiche Untersuchungen auf der Basis der Korrelationskurve durchgeführt. Nach der Form der Kurve wurde eine Normalverteilungsdichtefunktion gewählt. Es konnte folgende Korrelationsgleichung (Gl. 1) aufgestellt werden:

$$\varphi = e^{2.4798 - 0.0018(TG-25)^2} + 10.6 \quad (\text{Gl. 1})$$

$\varphi$ : Reibungswinkel ( $^{\circ}$ )  
TG: Tongehalt (%)

Der Korrelationskoeffizient beträgt - 0.97, d. h. diese Gleichung besitzt eine gute Glaubwürdigkeit. Die Ergebnisse der Rückrechnung des Reibungswinkels mit Hilfe von (Gl. 1) sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Man kann erkennen, daß nur eine geringe Abweichung von ca. 0.1 bis 0.5 Grad zwischen den berechneten und den im Labor ermittelten Werten vorliegt. Bei niedrigerem Tongehalt (TG < 30 %) beträgt die Abweichung bis zu 3 Grad. Dies ist allerdings wohl darauf zurückzuführen, daß eine zu geringe Anzahl an Proben mit einem Tongehalt unter 30 % zur Verfügung stand. Da der Tongehalt von Tonzwischenschichten jedoch in der Regel über 30 % beträgt, kommt der Gleichung 1 dennoch eine große praktische Bedeutung zu. Wenn man den Tongehalt der Tonzwischenschichten bestimmt, läßt sich der Reibungswinkel durch diese Gleichung leicht berechnen. Da der Tongehalt in Gleichung 1 nach der chinesischen Norm (Tonfraktion < 0.005 mm) bestimmt wurde und keine eigenen Daten nach der internationalen Norm (< 0.002 mm) vorliegen, wurden SKEMPTONs (1985) Ergebnisse dazu benutzt, eine weitere Korrelationsgleichung aufzustellen.

Die Gleichung lautet:

$$\varphi = e^{2.7818-0.0018(TG-10)^2} + 8.9 \quad (Gl. 2)$$

$\varphi$ : Reibungswinkel ( $^{\circ}$ )

TG: Tongehalt (%)

Die Ergebnisse der Überprüfung der durch Gleichung 2 berechneten mit den experimentell ermittelten Reibungswinkeln sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Der Korrelationskoeffizient beträgt -0.96, d. h. daß diese Gleichung ebenfalls eine gute Glaubwürdigkeit besitzt. Vergleicht man beide Gleichungen miteinander, so kann man feststellen, daß die Koeffizienten der Quadratzahl jeweils 0.0018 betragen. Dies zeigt, daß es einen Funktionszusammenhang zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit tatsächlich gibt.

#### 4. MECHANISMUS DER BEEINFLUSSUNG DER SCHERFESTIGKEIT DURCH DEN TONGEHALT

Wie oben dargelegt, hat der Tongehalt einen bedeutenden Einfluß auf die Scherfestigkeit von Tonzwischenschichten. Anhand der Untersuchungsergebnisse kann nachgewiesen werden, daß das Mikrogefüge der Tonzwischenschichten eine große Rolle spielt. Unterschiedliche Tongehalte haben auch verschiedene Mikrogefüge zur Folge. Das Mikrogefüge von Tonzwischenschichten läßt sich in drei Typen senkrecht zur Schichtung unterteilen, d.h. es gibt 3 Mikrogefügemodelle:

1. Wabengefüge
2. Zerstreungsgefüge
3. Einfassungsgefüge.

Tab. 3: Vergleich zwischen experimentell ermittelten und gerechneten Werten

$\varphi$  : experimenteller Reibungswinkel;  $\varphi'$  : berechneter Reibungswinkel

TG(%)	74	55	60	58	56	53	52	50	48	48	47	43	41	40	38	26
$\varphi(^{\circ})$	10.7	11.2	11.9	12.4	13.0	14.6	13.5	15.5	16.4	14.5	15.4	18.0	17.5	18.3	17.5	19.0
$\varphi'(^{\circ})$	10.8	11.3	11.9	12.3	12.7	13.5	13.8	14.5	15.2	15.2	15.5	17.3	17.3	18.1	18.6	19.4
tg $\varphi$	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.26	0.24	0.28	0.29	0.26	0.28	0.32	0.32	0.33	0.32	0.34
tg $\varphi'$	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28	0.31	0.31	0.34	0.35	0.41

\* Nach Gleichung 1); TG < 0.005 mm.

TG(%)	63.2	61.5	59.5	58	47.5	46	43	41.5	40	38	35	31.5	29.5	28.5	23.5	13.5
$\varphi(^{\circ})$	9.2	9.0	9.0	9.0	11.0	11.5	11.5	11.5	13.5	12.0	13.5	17.0	16.5	13.5	19.8	31.5
$\varphi'(^{\circ})$	9.0	9.0	9.1	9.2	10.2	10.5	11.2	11.6	12.1	12.8	14.1	15.9	17.0	17.6	20.5	24.7
tg $\varphi$	0.16	0.16	0.16	0.16	0.19	0.20	0.20	0.20	0.24	0.21	0.24	0.31	0.30	0.24	0.36	0.61
tg $\varphi'$	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.23	0.25	0.28	0.31	0.32	0.37	0.50

\* Nach Gleichung 2); TG < 0.002 mm

#### 4.1 Wabengefüge

Liegt der Tongehalt von Tonzwischenschichten bei 60 Gew.-% oder darüber, so kann man mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) das sogenannte Wabengefüge beobachten. Die richtungsgebenden Tonmineralpartikel und -aggregate regeln sich bevorzugt in der Scherzone ein (Abb. 5a, Abb. 7a). Wesentlicher Bindungskontakt ist der interpartikulare Fläche-zu-Fläche (SS) -Kontakt, zwei weitere Bindungskontakte sind die Kante-zu-Kante (EE) und Kante-zu-Fläche (ES) -Kontakte (Abb. 4).

Die Scherfestigkeit ist sehr gering, und beim Schervorgang wird eine glatte Scherfläche entstehen. Es fällt auf, daß das Wabengefüge bei Tongehalten über 60 Gew.-% keine große Änderung aufweist. Infolgedessen kann die Scherfestigkeit von Tonzwischenschichten in der Korrelationskurve (Abb. 2) nicht mehr abnehmen.

#### 4.2 Zerstreungsgefüge

Bei Tongehalten von 40 - 60 Gew.-% ist das Mikrogefüge der Tonzwischenschichten oftmals ein Zerstreungsgefüge. Dieses Zerstreungsgefüge ist ein Mikrogefüge, bei dem grobe Körner gleichmäßig in feineren Tonmineralpartikeln und -aggregaten zerstreut liegen. Die groben Körner haben keinen direkten Kontakt miteinander (Abb. 5b, 5c). Senkrecht zur Schichtung kann man Fläche-zu-Fläche -Kontakt, Kante-zu-Fläche-Kontakt und Kante-zu-Kante -Kontakt erkennen (Abb. 7b). Dabei überwiegt der Kante-zu-Kante -Kontakt etwas. Parallel zur Schichtung kann man einige schwächer bevorzugte Ausrichtungen und sehr kleine Unebenheiten auf der Scherfläche beobachten (Abb. 8 a, 8b).

Beim Schervorgang wird die Scherkraft hauptsächlich durch feine Körner übertragen, aber auch die groben Körner haben einen gewissen Einfluß. Da bei Tongehalten von 40-60 Gew.-% Fein- und Grobkornanteil annähernd gleich groß sind, hat die Zu- oder Ab-

nahme des Tongehalts einen großen Einfluß auf die Scherfestigkeit. Diesen Zusammenhang kann man in der Korrelationskurve erkennen.

#### 4.3 Einfassungsgefüge

Wenn der Tongehalt der Tonzwischenschichten bei 25-40 Gew.-% liegt, kann man mit Hilfe der REM das sogenannte Einfassungsgefüge beobachten (Abb. 6). Merkmal dieses Mikrogefüges ist ein höherer Anteil an Grobkörnern, die von Tonmineralpartikeln umschlossen sind. Wesentlicher Bindungskontakt ist der Kante-zu-Fläche -Kontakt. Beim Schervorgang wird die Scherkraft vor allem durch Grobkörner übertragen. Auf der Scherfläche sind wellige Unebenheiten deutlich sichtbar. Tonzwischenschichten, die ein derartiges Mikrogefüge besitzen, haben daher eine relativ hohe Scherfestigkeit.

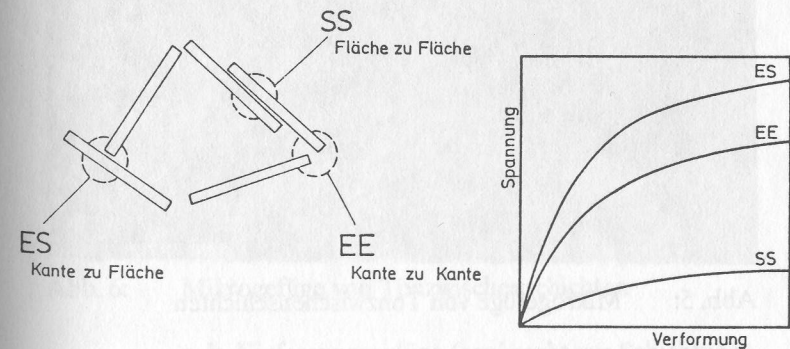


Abb. 4: Interpartikuläre Tonmineralkontakte und deren relative Bindungsfestigkeit (nach V. FEESER, 1986)

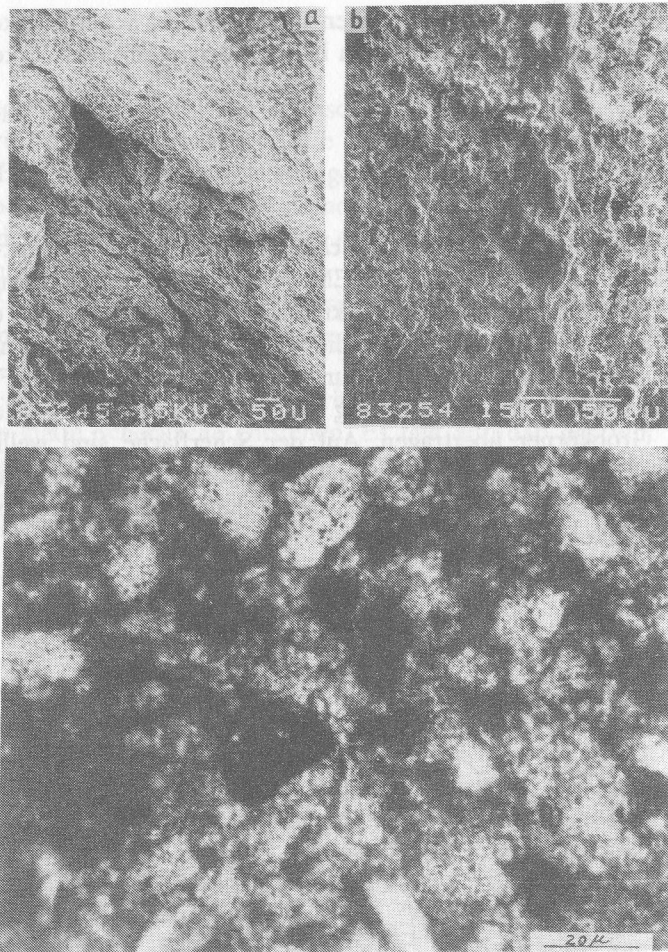


Abb. 5: Mikrogefüge von Tonzwischenschichten

- a. Wabengefüge (senkrecht zur Schichtung)  
REM-Aufnahme, ca. 70-fache Vergrößerung
- b. Zerstreuungsgefüge (senkrecht zur Schichtung)  
REM-Aufnahme, ca. 28-fache Vergrößerung
- c. Zerstreuungsgefüge (senkrecht zur Schichtung)  
LPL-Aufnahme, ca. 630-fache Vergrößerung

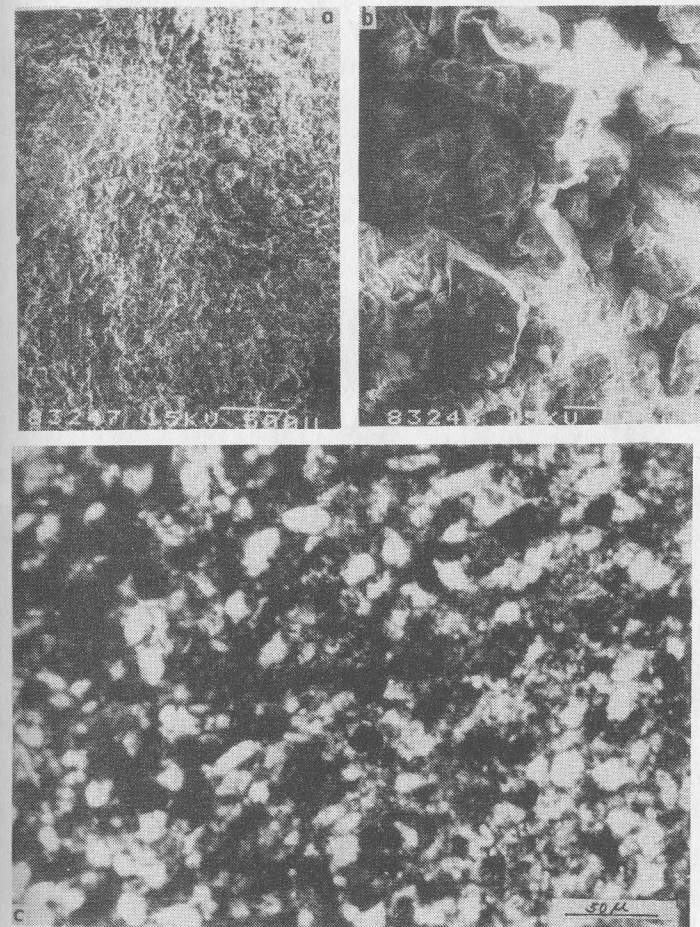


Abb. 6: Mikrogefüge von Tonzwischenschichten

- a. b. Einfassungsgefüge (senkrecht zur Schichtung)  
REM-Aufnahme, 26 (a)- bzw. ca. 240 (b)-fache Vergrößerung
- c. Einfassungsgefüge (senkrecht zur Schichtung)  
LPL-Aufnahme, ca. 250-fache Vergrößerung

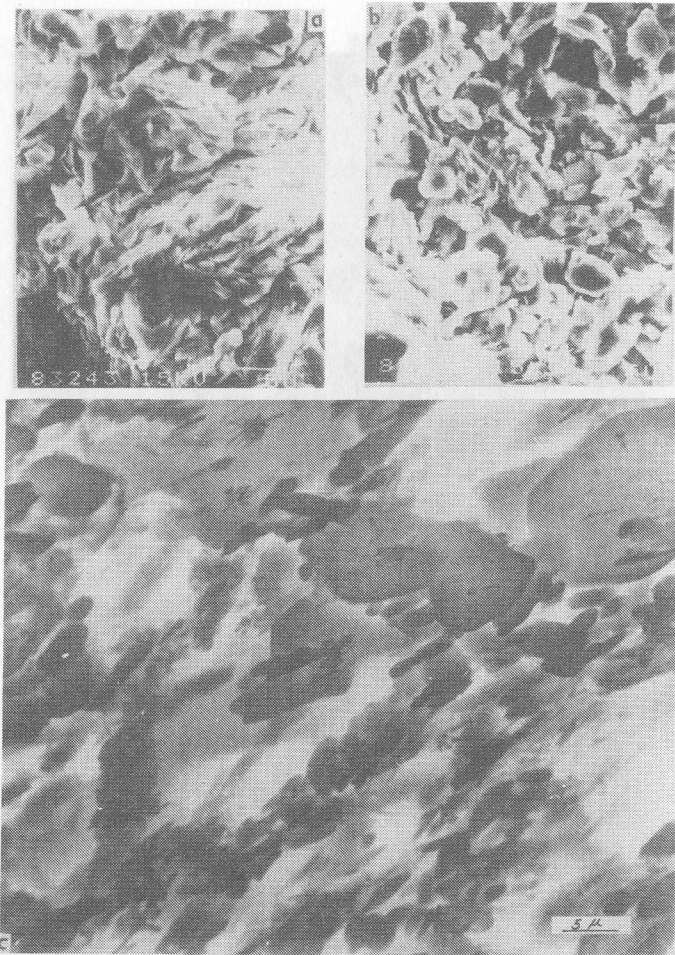


Abb. 7: Mikrogefüge von Tonzwischenschichten

- a. Wabengefüge (senkrecht zur Schichtung)  
REM-Aufnahme, ca. 980-fache Vergrößerung
- b. Zerstreuungsgefüge (senkrecht zur Schichtung)  
REM-Aufnahme, ca. 980-fache Vergrößerung
- c. Wabengefüge (parallel zur Schichtung)  
REM-Aufnahme, ca. 1540-fache Vergrößerung

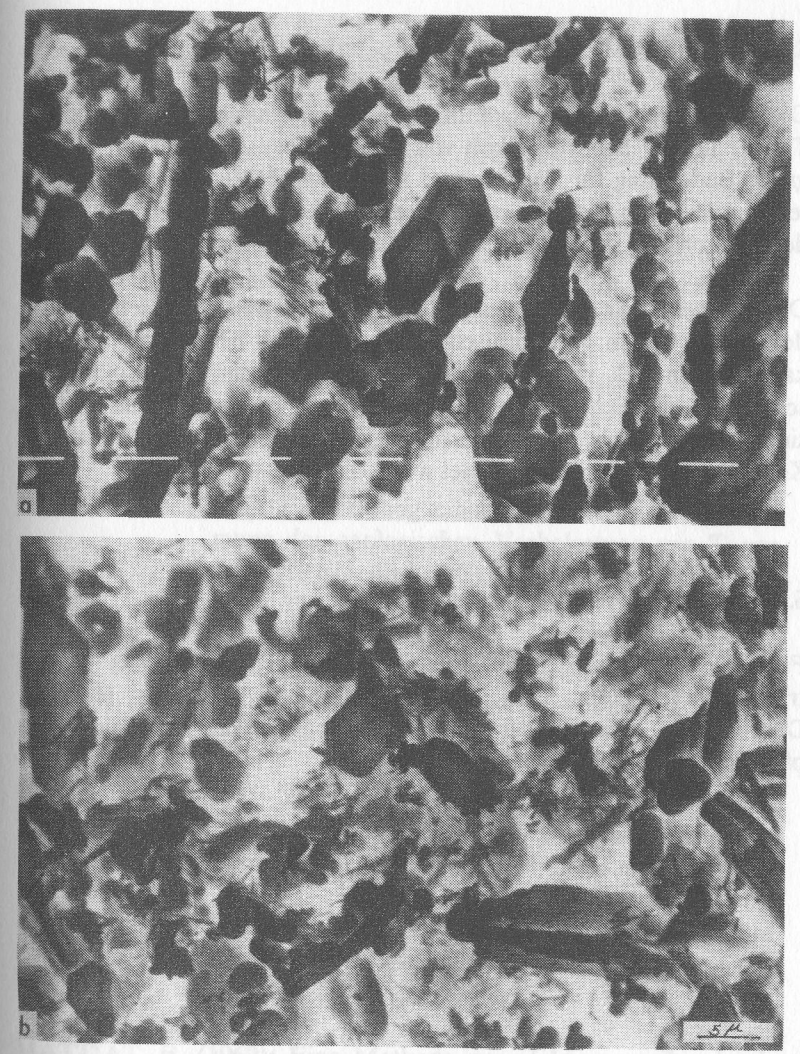


Abb. 8: Mikrogefüge von Tonzwischenschichten

- a. b. Zerstreuungsgefüge (parallel zur Schichtung)  
REM-Aufnahmen, ca. 1540-fache Vergrößerung



## 5. SCHLUSSBEMERKUNG

Die Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen Tongehalt und Scherfestigkeit von Tonzwischenschichten hat eine große Bedeutung für Theorie und Praxis. Mit Hilfe der vorgestellten Untersuchungen kann man diesen Mechanismus des Einflusses des Tongehaltes auf die Scherfestigkeit erkennen.

Der Tongehalt ist ein wirtschaftlich günstiger und praktischer Index, der in jedem geotechnischen Labor schnell bestimmt werden kann. Wenn z.B. wegen geringer Mächtigkeit der Tonzwischenschichten keine Scherversuche an ungestörten Proben durchführbar sind, kann die Scherfestigkeit durch den Tongehalt mit Hilfe der Korrelationsgleichung berechnet werden.

## 6. DANKSAGUNG

Für die freundliche Unterstützung bei der Vorbereitung des Vortrages bin ich Herrn Prof. Dr. techn. Dr.phil. K. Czurda, Herrn Dipl.-Geol. C. Donié und Frau Dipl.-Geol. U. Böhler zu Dank verpflichtet.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- ATTEWELL, P.B., FARMER, I.W. (1976): Principles of Engineering Geology.- 1045 S.; London (Chapman and Hall).
- COLLINS, K., MCGOWN, A. (1974): The form and function of microfabric features in a variety of natural soils.- Geotechnique, 24 (2):223-254; London.
- CZURDA, K. (1978): Standsicherheit von Böschungen: mikrotex-turelle und petrologische Faktoren.- Geol. Palont.- Mitt. Innsbruck, 8:289-316; Innsbruck.
- FEESER, V. (1986): Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der geologischen Vorbelastung von Tonen auf gefügekundlicher Grundlage.- Geol. Jb., Reihe C, 46: 136 S.; Hannover.
- GIBO, S. (1987): Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan.- Canadian Geotechnical Journal, 24: 456-461; Canada.
- KANJI, M.A. (1974): The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils.- Geotechnique, 24 (4):671-674; London.
- LAMA, R.D. (1978): Influence of clay fillings on shear behaviour of joints.- Int. Assoc. of Eng. Geol., 3th Int. Congress, vol. 2.
- MATTIAT, B. (1969): Eine Methode zur elektronenmikroskopischen Untersuchung des Mikrogefüges in tonigen Sedimenten.- Geol. Jb., Reihe B, 88, 87- 111, Hannover.

- MESRI, G., CEPEDA-DIAZ, A.F. (1986): Residual shear strength of clays and shales.- *Geotechnique*, **36** (2):269-274; London.
- SKEMPTON, A.W. (1964): Long-term stability of clay slopes.- *Geotechnique*, **14**(2): 75-101; London.
- SKEMPTON, A.W. (1985): Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory.- *Geotechnique*, **35** (1): 3-18; London.
- XIANG, W. (1984): The effect of clay fraction on the shear strength of argillaceous intercalations in rock-mass.- *Journal of University Lanzhou*, **20** (3): 121-125; Lanzhou.
- XIANG, W. (1985): The study of microstructures of weak intercalations and their mechanical significance.- *Earth Science*, **10** (1): 165-169; Wuhan.

**DIAGENETISCHES VERHALTEN UND SELTEN-ERDEN-KONZENTRATIONEN ALS KRITERIUM ZUR DIFFERENZIERUNG VON SMECTITEN IN TERTIÄREN OBERRHEIN-GRABEN-SEDIMENTEN**

**Diagenesis and Rare Earth Concentrations - a Criterion for the Differentiation of Smectites in Tertiary Upper Rhinegraben Sediments**

M.M. STEIN

Hannover Umwelt Technik GmbH  
Impexstr. 5, 6909 Walldorf

**KURZFASSUNG**

Die Smectite und I/S-Mixed Layer tertiärer Oberrheingraben-Sedimente aus a) Tonsteinen b) vulkanoklastischen Tonsteinen c) Sandsteinen weisen unterschiedliche Diageneseverhalten auf. Die Seltenen Erden (SE) in der Tonfraktion der Sandsteine sind deutlich an intermediären SE angereichert. Dies ist eine Folge 1) des SE-Angebotes aus der Auflösung von Feldspäten und vulkanischen Gläsern und 2) einer Desorption von SE aus den randlichen Partien der Tonsteinlagen. Die SE sind so fest an die Tonminerale fixiert, daß sie zur Differenzierung genetischer Unterschiede gleicher Tonminerale geeignet sind.

**ABSTRACT**

Smectite and I/S-Mixed Layers from the tertiary fill of the Rhinegraben in a) Claystones b) Claystones rich in volcanic components c) Sandstones show differences in Diagenesis.