

- [8] GUDEHUS, G. (1980): Stoffgesetze der Bodenmechanik. In Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch, 3.Aufl., Teil 1:117-144, Ernst & Sohn (Berlin).
- [9] KOLYMBAS, D. (1988): Eine konstitutive Theorie für Böden und andere körnige Stoffe.- Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmech. Univ. Karlsruhe 109, 123 S.
- [10] LAGALY, G. (1986): Anorganische Systeme - Tonmineraldispersionen. In Kulicke, W.M. (Hrsg.): Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen, Hüthig und Wepf (Basel).
- [11] LEINENKUGEL, H.J. (1976): Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalische Deutung.- Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmech. Univ. Karlsruhe 66, 139 S.
- [12] LOCAT, J., BERUBE, M-A., CHAGNON, J-Y. and GELINAS, P. (1985): The mineralogy of sensitive clays in relation to some engineering problems - an overview.- App. Clay Sci. 1: 193-205.
- [13] MADSEN, F.TH. (1976): Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldrucks nach der DLVO-Theorie.- Mitt. Inst. Grundb. Bodenmech. ETH Zürich 108, 65 S.
- [14] MITCHELL, J.K., CAMPANELLA, R.G. and SINGH, A. (1968): Soil creep as a rate process.- J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 94(SM1): 231-253.
- [15] MITCHELL, J.K. (1964): Shearing resistance of soils as a rate process.- J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 90(SM 1): 29-61.
- [16] ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A.N. and WROTH, C.P. (1958): On the yielding of soils.- Géotechnique 8: 22-53.
- [17] ROSENQVIST, I.TH. (1962): The influence of physico-chemical factors upon the mechanical properties of clays.- Proc. Natl. Conf. Clays Clay Minerals, 9th Natl. Acad. Sci. Natl Res. Council: 12-27.
- [18] SCHOFIELD, A.N. and WROTH, C.P. (1968): Critical state soil mechanics.- McGraw Hill (London).
- [19] TAYLOR, D.W. (1948): Fundamentals of soil mechanics.- Wiley (New York).
- [20] TERZAGHI, K. (1925): Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage.- Deuticke (Leipzig und Wien).
- [21] VEES, E. (1970): Die Gesetzmäßigkeiten der Ionenbeläge und ihre Heranziehung zur Deutung des Verhaltens bodenmechanischer Kenngrößen.- Diss. Univ. Stuttgart.
- [22] VERWEY, E.J.W. and OVERBEEK, J.TH.G. (1948): Theory of the stability of lyophobic colloids.- Elsevier (Amsterdam).
- [23] VIRDI, S.P.S. (1984): Rheology of soils with special reference to temperature effects.- D.Thesis Lancaster Polytechnic, UK.
- [24] YONG, R.N. (1988): Interaction of clay and industrial waste: a summary review.- Soil Mech. Ser. Geotech. Res. Centre, McGill Univ. Montréal 54, 13 pp.

Tongesteine als Barrieren für Deponien und ihre Eignung

Rolf Nüesch

1. Einleitung

Tongesteine gelten aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit und dem Rückhaltevermögen von Schadstoffen als besonders geeignet für Deponiebarrieren. Daher spielen Tongesteine und Tone eine wichtige Rolle als natürlicher Untergrund bei der Wahl eines Deponiestandortes und als zusätzlich künstlich eingebrachte Barriere beim Deponiebau. Sickerwässer aus der Deponie können die günstigen Eigenschaften der Tone einer künstlichen Barriere so beeinträchtigen, dass die Barrierenfunktion nicht mehr erfüllt wird (Madsen & Mitchell, 1989). Deshalb ist der Einbezug von natürlichen Tonen und Tongesteinen als geologische Barriere aus Sicherheitsgründen notwendig. Jedoch das alleinige Abstützen auf die Wirksamkeit von natürlichen Barrieren ist riskant, denn sedimentäre und strukturelle Anisotropien stellen potentielle Fließwege dar.

Diese Arbeit befasst sich mit strukturellen Anisotropien in tonigen Sedimenten. Unter strukturellen Anisotropien werden Risse, Klüfte und Knickbänder verstanden, welche durch Deformation entstanden sind. Diese auftretenden Deformationserscheinungen werden mit dem kataklastischen Deformationsmechanismus der Tongesteine erklärt. Kataklastisches Deformationsverhalten wurde aber auch in Dünnschliffen aufgearbeiteter Tone festgestellt und daher wird derselbe Deformationsmechanismus auch auf Tone angewandt. Daraus folgt als wichtiges Resultat, dass die für Tone so charakteristische Plastizität nur ein makroskopisches Verhalten darstellt und kein Deformationsmechanismus ist. Der kataklastische Deformationsmechanismus bedeutet Konzentration von Deformation auf eng begrenzte Bereiche, welche sich als strukturelle Anisotropien wie Risse, Brüche und Knickbänder manifestieren. Solche diskrete Deformationszonen können zu erhöhter Durchlässigkeit führen.

Für Deponiebarrieren aus Tongesteinen und aufgearbeiteten Tonen kann daher Deformation die Barrierenwirkung in Frage stellen. Daraus ergeben sich Konsequenzen in der Wahl des Barrierenmaterials, in der Barrierenkonstruktion und im Einbringen der Barriere.

Adresse: Institut für Geotechnik IGT

Tonmineralogisches Labor

Sonneggstrasse 5, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich

2. Problemstellung

Die Eignung von Tongesteinen und Tonen als Barrieren für Deponien muss beurteilt werden können. Dazu sind Beurteilungskriterien notwendig, welche die Eigenschaften der Tone und Tongesteine charakterisieren. Dies sind nach Hasenpatt et al. (1988) für tonige Barrieren folgende tonmineralogische und bodenmechanische Parameter: Art und Anteil der Tonminerale, Kationenbelegung und -austauschfähigkeit, Quell- und Schrumpfverhalten, Plastizitätsgrenzen, Durchlässigkeit des unbeeinflussten Materials und des mit Sickerwasser beaufschlagten Materials und der apparente Diffusionskoeffizient unter Diffusions- und Dispersionsbedingungen. Für die Bestimmung dieser Parameter wird das Probenmaterial aufgearbeitet und homogenisiert. Dabei wird das Gefüge zerstört und damit die für Tongesteine und Tone charakteristische Anisotropie, welche Eigenschaften wie z.B. Durchlässigkeit, Quellung und Festigkeit massgebend beeinflusst. Daher lassen sich die im Labor an homogenisierten Tonen bestimmten Parameter nur beschränkt auf Tongesteine mit einer anisotropen Textur übertragen. In undeformierten Tongesteinen sind die Tonteilchen als Folge der Gesteinsbildung mehr oder weniger parallel eingelagert. Weiter wurde bisher nicht berücksichtigt, dass durch das Deformationsverhalten von Tongesteinen und Tonen mit anisotroper Textur zusätzliche, strukturelle Anisotropien entstehen können. Gerade die Durchlässigkeit kann aber durch strukturelle Anisotropien viel grösser werden als diejenige, welche an homogenen Proben bestimmt wurde.

3. Probenmaterial

Als wichtigste potentielle Barrierenmaterialien kommen in der Schweiz natürliche mesozoische und tertiäre Tongesteine, sowie zur Verbesserung der Barriereneigenschaften hochwertige aufgearbeitete Tone wie Bentonite in Frage. Der Unterschied zwischen tonigen Sedimenten und hochwertigen Bentoniten lässt sich im ternären Diagramm mit den Endpunkten quellfähige Tonminerale, nicht quellfähige Tonminerale und Nichttonminerale darstellen (Fig.1). Dem in dieser Arbeit weiter untersuchten Opalinuston (unterer Dogger) werden einerseits sulfathaltige Tone der Trias (Anhydritgruppe, Wellengebirge und Gipskeuper), karbonathaltige Tone des unteren Malm (Effingerschichten) und quarz-, karbonathaltige Tone des Tertiärs (untere Süswassermolasse USM) gegenübergestellt. Beachtenswert ist die Streubreite in der Zusammensetzung des Opalinustones, welcher mineralogisch und sedimentologisch als eine monotone Formation gilt. Die Streubreite des Anteils der quellfähigen Tonmineralien im Opalinuston

umfasst die anderen Tone und steht im auffälligen Gegensatz zu den beiden Bentoniten Montigel (Ca-Montmorillonit) und MX-80 (Na-Montmorillonit). Auch die beiden Bentonite bestehen aus 75 resp. 71% quellfähigem Montmorillonit (Müller-Vonmoos & Kahr, 1983). Die Experimente zur Bestimmung des Deformationsverhalten wurden an Opalinuston durchgeführt.

4. Deformationsverhalten von Tongesteinen und Tonen

Die Untersuchungen wurden mit einer Triaxialapparatur an Opalinuston (ca. 20% mixed layer, 15% Illit, 10% Chlorit, 10% Kaolinit, 30% Quarz, 10% Calcit und 5% Akzessorien) durchgeführt. Es wurden Gesteinsproben mit der Schichtung senkrecht und parallel zur grössten Hauptspannung, sowie mit 5MPa kalt gesinterte Proben untersucht. Die Proben (Zylinder mit 12mmØ und ca. 25mm Höhe) wurden bei Temperaturen von 20-350°C und Manteldrücken von 0.1-400MPa mit Verformungsgeschwindigkeiten von ca. 10^{-4} bis ca. 10^{-6} s deformiert. Dabei deformierten Tongesteine und Tone kataklastisch. (Nüesch, in Vorb.). Kataklastisches Fliessen beinhaltet die Kataklastik (Zerbrechen) der Teilchen und ihre Bewegung. Dies ist der bevorzugte Prozess bei niedrigem effektivem Umgebungsdruck (z.B. hervorgerufen durch hohen Porendruck), tiefer Temperatur und hoher Verformungsrate (Paterson, 1978). Für Tongesteine ist kataklastisches Fliessen der wichtigste Deformationsmechanismus, welcher makroskopisch sowohl sprödes wie duktils Verhalten zulässt. Beides konnte makroskopisch an den experimentell deformierten Proben beobachtet werden: das spröde Zerbrechen der Proben an Scherflächen bei geringem Manteldruck wie auch die duktile Verformung von ursprünglichen Zylindern zu Fässchen bei höheren Manteldrücken oder bei porenwasserhaltigen Proben. Innerhalb des kataklastischen Deformationsmechanismus werden mit zunehmendem Wassergehalt immer kleinere Einheiten (Regime) von der Deformation erfasst (Fig.2). Bei fest adsorbiertem Wasser (Wassergehalt <15Vol%) findet die Deformation im Aggregat-Regime statt - Aggregate werden zerbrochen. Vermutlich erst mit der vierten, nur noch schwach adsorbierten Wasserschicht der Tonteilchen werden zunehmend Tonminerale von der Deformation erfasst. Dabei werden die Tonminerale auch noch in ihre einzelnen Schichten separiert. Die Kataklastik des Tonminerals wird durch grossen Elementarschichtabstand infolge angelagerter Wasserschichten und freiem Porenwasser begünstigt. Bei den vorliegenden Deformationsversuchen, welche bei 50MPa Manteldruck und Raumtemperatur durchgeführt wurden, wird das

Tonmineralregime bei 15-25Vol% Wasser von der Katalase betroffen. Bei ca. 25 Vol% Wasser wird aufgrund der Festigkeit ein Übergang vom kataklastischen Fliessen zum Deformationsmechanismus einer Tonmineraldispersion angenommen. Diese Beobachtungen entsprechen dem kataklastischen Fliessen mit Deformation durch Zerbrechen in Fragmente und deren relativen Bewegung (Paterson 1978). Gleiten und Rotation von Zerbrochenem wird durch die Adsorptionsfähigkeit der Tonminerale bei wasserhaltigen Proben besonders begünstigt.

Alle Proben mit freiem Porenwasser (bei Opalinuston z.B. ab ca. 4 Gew.% Wasser bei 50MPa Manteldruck, vgl. dazu Haas, in Vorb.) deformierten makroskopisch duktil, weisen aber mikroskopisch Knickbänder und diskrete Scherzonen wie Riedel-Systeme auf (Fig.3a). Aufgrund dieser mikrostrukturellen Ähnlichkeiten mit den sich spröde verhaltenden Gesteinsproben wird ein kataklastischer Deformationsmechanismus auch für duktil deformierte, porenwasserhaltige Proben postuliert. Maltmann (1982) fand in einem unter geringem Manteldruck (0.3 MPa) experimentell gescherten ball clay (45%Kaolinit, 20% Illit, 30% Quarz, 5% org.Material) eine Schieferung, welche die ursprüngliche Schichtung schnitt, obschon die Probe schichtparallel geschert wurde. Nach Maltman (1987) sind experimentell erzeugte Scherzonen in Proben mit ca. 15% Wassergehalt spröde und selbst bei 60% Wasser zeigen mikroskopisch die extrem weichen Proben Verformung, welche sich auf kurze, enge Bereich beschränkt.

5. Schlussfolgerungen

Für das Funktionieren einer geologischen Barriere sind spröde und spröde-duktiler Erscheinungen von Nachteil. Solche Deformationszonen sind im Aufschluss als Klüfte, Klüftzonen und Knickbänder zu beobachten (Fig.3b). Beim Auftreten von Klüften und Knickbändern an einem möglichen Deponiestandort oder im Bereich einer Deponie stellt sich die Frage, wie tief solche Deformationszonen in den Untergrund reichen. Denn durch solche strukturell bedingten Makroporen ist die geforderte geringe Durchlässigkeit in Frage gestellt. Deshalb ist das Bewerten der Deformationszonen hinsichtlich ihrer Wegsamkeit für Deponiewässer wichtig.

1. Es wird zwischen Entspannungsklüften (Oberflächenerscheinungen) einerseits und tiefer reichenden Störungszonen andererseits unterschieden, welche die als natürliche Barriere vorgesehene Tonformation durchschlagen können.
2. Klüftbeläge sind wichtige Hinweise für tiefer reichende Störungen, besonders bei gehäuftem Auftreten von Eisenhydroxid- und Gipsbildungen.

3. Die Analyse von tieferreichenden Deformationszonen muss mit der regionalen Tektonik übereinstimmen.

4. Oberflächennahe Entlastungs- und Verwitterungsprozesse können natürliche Barrieren ebenfalls in Frage stellen. Als Folge des Grubenaushubes findet eine langandauernde Entlastung des Gesteins statt, die auch das Gewicht des nachträglich eingebrachten Deponiegutes nicht rückgängig macht. Das feste Gestein zerfällt unter der Bildung von feinen Rissen, Spalten und Klüften zu Lockergestein.

5. Künstliche Tonbarrieren bestehen aus aufgearbeiteten Tonen, welche durch grobe Zerkleinerung (oft nur <10cm) und Wiederverfestigung des anstehenden Gesteins entstehen. Das mechanische Verhalten solcher Barrieren wird mit gesinterten Proben verglichen, welche auch bei hohem Wassergehalt im Mikrobereich kataklastisch deformieren. Spannungskonzentrationen, z.B. durch unsorgfältiges Einbringen der künstlichen Barriere, könnten zu Rissen und einer erhöhten Durchlässigkeit von Deponiewässern führen.

6. Zusammenfassung

Die Barrierenfunktion von Tongesteinen und Tonen wird durch strukturelle Anisotropien, bedingt durch das kataklastische Deformationsverhalten, in Frage gestellt. Daher erfordern natürliche Barrieren aus Tongesteinen eine zusätzliche künstliche Barriere. Aber auch künstlich eingebrachte Tonbarrieren aus aufgearbeitetem Ton deformieren im Mikrobereich kataklastisch, d.h. die Deformation konzentriert sich auf diskrete Bereiche, welche z.B. durch Risse die positiven Eigenschaften der Tone beeinträchtigen können. Auch aus diesem Grund ist die Forderung (z.B. von Weiss, 1988) nach mehrschichtig eingebrachten mineralischen Barrieren aus möglichst hochwertigem Ton (Bentonit) sinnvoll. Das sorgfältige Einbringen der Barriere scheint sehr wichtig zu sein. Für die Eignung der Tongesteine und Tone als Barrieren sind tonmineralogische und bodenmechanische Parameter wohl wichtig zur Beurteilung des tonigen Materials, garantieren aber nicht das einwandfreie Funktionieren einer Barriere. Mit einer Gefügeanalyse können strukturelle Anisotropien erkannt werden.

Tongesteine als potentielle Barrierenmaterialien

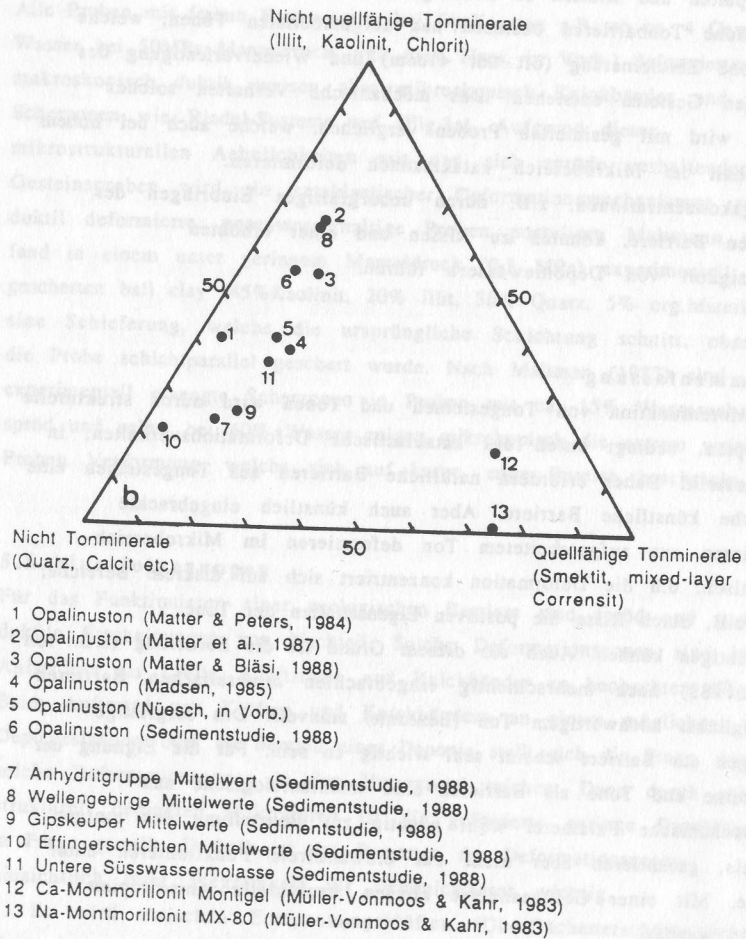


Fig.1: Mesozoische und tertiäre Tongesteine und Mergel weisen bezüglich der quellfähigen Tonminerale eine ähnliche Zusammensetzung auf und unterscheiden sich deutlich von den Bentoniten (12,13).

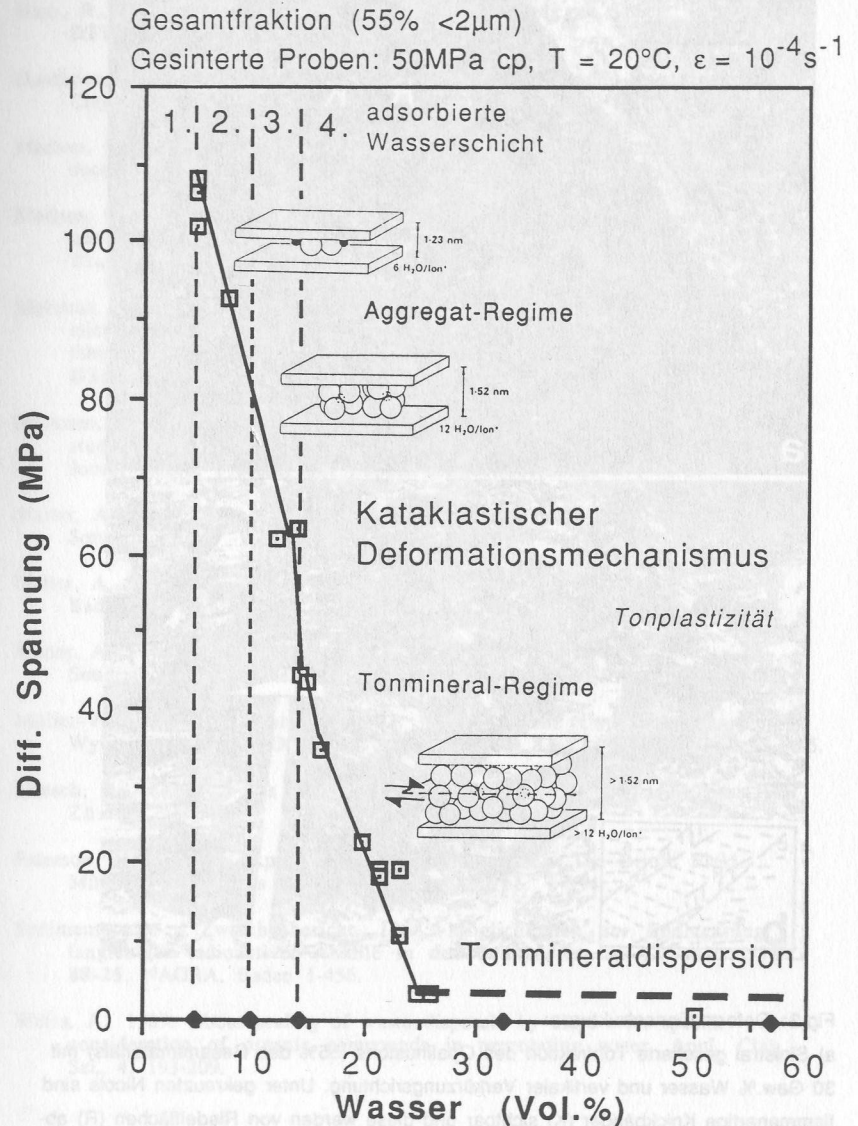


Fig.2: Deformationsmodell: Kataklastischer Deformationsmechanismus findet bei Tonen und Tongesteinen in verschiedenen Regimen statt. Der Wechsel vom Aggregat- zum Tonmineralregime ist vom Wassergehalt abhängig. Tonplastizität ist nur die makroskopisch charakteristische Eigenschaft der Tone, denn Tonaggregate und Tonminerale deformieren kataklastisch. Die Tonminerale werden mit zunehmendem Wassergehalt in ihre Elementarschichten zerlegt (Kataklase) mit Übergang zur Rheologie der Tonmineraldispersion.

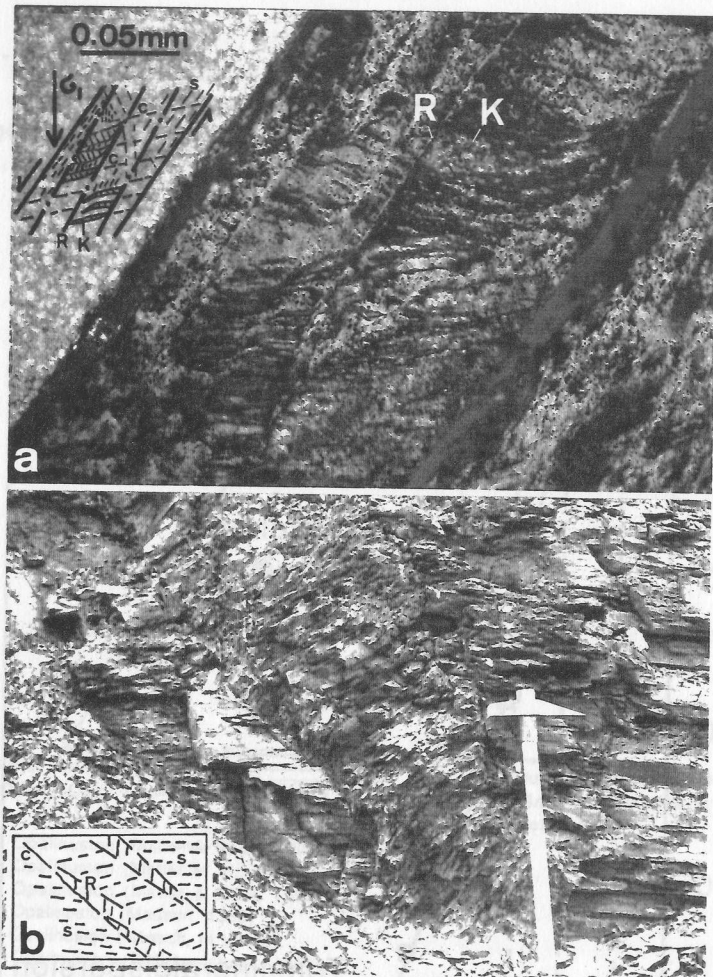


Fig.3: Deformationsstrukturen:

- a) Sinistral gescherte Tonfraktion des Opalinustons (55% des Gesamtmaterials) mit 30 Gew.% Wasser und vertikaler Verkürzungsrichtung. Unter gekreuzten Nicols sind flammenartige Knickbänder (K) sichtbar und diese werden von Riedelflächen (R) abgeschnitten. Die Knickbandbegrenzung (c) schneidet die ursprüngliche Schichtung (s).
- b) Knickband im Aufschlussbereich von Opalinuston mit randlichen Ansätzen von Riedelsystemen ist ein Hinweis auf eine tieferreichende strukturelle Anisotropie.

Literaturverzeichnis

Haas, R., in Vorb.: Bedeutung der Isothermenmessung an Tonen. Publ. zur DTTG-Tagung in Wien 1990.

Hasenpatt, R., Degen, W., Kahr, G., 1989: Flow and diffusion in clays. Appl. Clay Sci.4, 179-192.

Madsen, F.T., Mitchell, J.K., 1989: Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination. Mitt. IGB ETH Zürich, 135, pp. 1-67.

Madsen, F.T., Müller-Vonmoos, M., 1985: Swelling pressure calculated from mineralogical properties of a Jurassic opalinum shale, Switzerland. Clays Clay Minerals 33, 501-509.

Maltman, A.J., 1982: Experimentally deformed clay (I): Cleavage-like microstructures. In: Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics (edited by Borradaile, G.J., Bayly, M.B. & Powell, C.McA.). ©Springer-Verlag, 426-433.

Maltman, A.J., 1987: Shear zones in argillaceous sediments- an experimental study. In deformation of sediments and sedimentary rocks (edited by Jones, M.E. & Preston, M.F.). Spec. Publ. geol. Soc. Lond. 29, 77-87.

Matter, A., Bläsi, H.R., 1989: Geologie und Petrographie der Sedimente. In: Sondierbohrung Weiach, NTB 88-08, NAGRA, Baden, 22-91.

Matter, A., Peters, Tj., 1984: Die Kernbohrung Beznau. NTB 84-34, NAGRA, Baden, 7-111.

Matter, A., Peters, Tj., Isenschmid, C., Bläsi, H.-R., Ziegler, H.-J., 1987: Sondierbohrung Riniken Geologie. NTB 86-02, NAGRA, Baden, 1-187.

Müller-Vonmoos, M., Kahr, G., 1983: Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. NTB 83-12, NAGRA, Baden, 1-15.

Nüesch, R., in Vorb.: Das mechanische Verhalten von Opalinuston. Diss. ETH Zürich

Paterson, M.S., 1978: Experimental rock deformation - The Brittle Field. Minerals and Rocks 13, Springer-Verlag, pp. 1-254.

Sedimentstudie - Zwischenbericht, 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. NTB 88-25, NAGRA, Baden 1-456.

Weiss, A., 1989: About sealing of waste disposals by clays with special consideration of organic compounds in percolating water. Appl. Clay Sci., 4, 193-209.