

Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck	Band 8 Festschrift W. HEISSEL	S. 289-316	Innsbruck, Sept. 1978
-----------------------------------	-------------------------------------	------------	-----------------------

Standssicherheit von Böschungen: mikrotexturale und petrologische Faktoren

von K. Czurda⁺⁾

Zusammenfassung

An tertiären klastischen Sedimentserien in N-Ungarn, die von Straßen- und Hochbaumaßnahmen betroffen wurden, sind petrologische, mikrotexturale und bodenphysikalische Untersuchungen angestellt worden. Die Schadensereignisse (Rotationsgleitungen), die zu vorliegender Studie geführt haben, sind an zwei Lokalitäten aufgetreten:

Gödöllö (34 km NE Budapest, Cegléd-Hügelland):

Die Rotationsgleitungen an Straßeneinschnitten an der Autobahnbaustelle in der Nähe von Gödöllö, nordöstlich von Budapest, erfolgten in tertiären, vorwiegend tonigen Sedimentabfolgen. Drei Tontypen wurden petrologisch und bezüglich bestimmter bodenphysikalischer Eigenschaften untersucht:

Ein schwarzer Ton, der bis zu 70% aus Montmorillonit besteht, ein gelber mit durchschnittlich 55% Quarzgehalt und geringem Montmorillonitanteil und ein roter Ton mit fast 50% Montmorillonit und fast 30% Quarz. Als besonders rutschungsfreudig wegen der hohen Plastizität und der hohen Scherwinkel, verbunden mit relativ geringer Kohäsion, erwiesen sich der schwarze und der rote Ton; beide sind durch hohe Montmorillonitgehalte ausgezeichnet. Die Sicherheitsfaktoren liegen, besonders unter der Voraussetzung eines Erdruhedrucks $K_0 = 0,5$, im System

⁺⁾ Anschrift des Verfassers: Univ.-Doz. Dr. Kurt Czurda,
Institut für Geologie und Paläontologie, Universitätsstr. 4,
A-6020 Innsbruck

($\tan \varphi / c$) für den schwarzen Ton überwiegend unter 0, so daß hierfür ein labiles Gleichgewicht jedenfalls offensichtlich wird. Die etwas höheren Werte für den Sicherheitsfaktor des roten Tons gehen auch konform mit der Standfestigkeit der betreffenden Böschung, die noch keinerlei Bewegungsabläufe erkennen läßt. Die Gleichgewicht haltende Beteiligung des "standsicheren" gelben Tons wird in den Gleitflächen durch die Überlagerung mit schwarzem Montmorillonit-Ton unwirksam gemacht.

Salgótarján (125 km NE Budapest, Cserhát-Gebirge):

Die Stadt Salgótarján liegt in einem sanften Taleinschnitt innerhalb einer tertiären Hügellandschaft des Cserhát-Gebirges. Am Pecske-Hügel, dessen sandig-schluffig-tonige Schichten flach in Richtung des Tals einfallen, wurden Wohnhochhäuser, Schulen etc. errichtet. Dies brachte größere Erdbewegungen, die Errichtung zweier Rückhaltebauern und das Aufbringen großer ständiger Lasten mit sich. Eine kombinierte Rotations-Lamellen-Gleitung mit empfindlichen bautechnischen und finanziellen Konsequenzen war die Folge.

Drei Toneinheiten können unterschieden werden: grauer mariner Ton, unterer und oberer bunter Ton. Die beiden bunten Toneinheiten haben sich als limnisch erwiesen. Der Nachweis, ob limnisch oder marin, war bedeutungsvoll: eine Mikrotextrur (Einordnung der plättchenförmigen Tonminerale in eine bevorzugte Richtung) konnte bei den bunten Tönen mittels Scanningaufnahmen beobachtet und auch röntgendiffraktometrisch nachgewiesen werden. Der paläontologische Befund, das Kationenspektrum, das Gefüge und schließlich das physikalische Verhalten wiesen die beiden oberen Toneinheiten (oberer und unterer bunter Ton) als Süßwasserablagerung aus. Gegenteilige Phänomene im grauen Ton bestätigen dessen marines Sedimentationsmilieu.

Vor allem die Scherparameter (Triaxial- und Rahmenscherversuch) und über diese Werte die Sicherheitsfaktoren, deckten charakteristische Unterschiede auf: beim marinen Ton sind - gleichgültig der Richtung der Hauptspannung - keine Unterschiede bezüglich Scherwinkel und Kohäsion festzustellen. Die Scherwinkel für die limnischen Tone bei Richtung der Normalspannung senkrecht ss sind kleiner als die der marinen Tone, aber deutlich größer als jene, die aus der Normalspannungsrichtung parallel ss resultieren.

Im Zugspannungsverhalten zeichnet sich für beide Tontypen folgender Trend ab: die Reißfestigkeit steigt zunächst proportional mit der Wassergehaltserhöhung an und wird dann rasch wieder geringer bei weiterer Wasserzugabe zur aufbereiteten Probe. Trends an ungestörten Proben sind nicht ausreichend nachgewiesen.

Während im Fall der Rotationsgleitungen von Gödöllő vor allem die unterschiedliche petrologische Zusammensetzung der Tontypen - und hier insbesondere der Quarz- und Montmorillonitgehalt - für die differenzierten bodenphysikalischen Eigenschaften ver-

antwortlich sind, kann dieser Aspekt im Fall der Tone von Salgótarján eher vernachlässigt werden. Zwar treten immerhin beachtliche Unterschiede im Quarzgehalt auf, doch ist der Montmorillonitgehalt in allen drei Tontypen relativ gering. Jedenfalls ist das Gefüge von ausschlaggebendem Einfluß.

Abstract

Petrological, microtextural and soilphysical studies were performed on tertiary clastic sedimentseries of northern Hungary. They were object of different underground and surface engineering activities. Rotational landslides, which led to the study under discussion, have occurred at two localities:

Gödöllő (34 km NE Budapest, Cegléd-hills)

Several rotational slides at road cuts of the motorway construction site near Gödöllő, have occurred within tertiary, mainly clayey sedimentseries. Three types of clay were studied petrologically and with respect to certain soilphysical parameters:

A black clay, consisting up to 70% of montmorillonite, a yellow one containing 55% quartz on average and only little montmorillonite and a red one with up to 50% montmorillonite and almost 30% quartz. Because of its high plasticity and comparatively low cohesion but nevertheless high friction angles, the black and red clay proved to be especially capable of sliding. Both clay types were characterized by high montmorillonite contents. The factors of safety for the black clay are 0 or below 0, especially in the case of a supposed static earth pressure $K_0 = 0,5$ within the system ($\tan \varphi / c$). The unstable equilibrium becomes apparent. The slightly higher values for the factor of safety for the red clay are in accordance with the stability of the slope in question, which up to now does not show any movement. The participation of the equilibrium retaining "stable" yellow clay becomes ineffective at the slip planes because of the superposition by the black montmorillonite-clay.

Salgótarján (125 km NE Budapest, Csérhat-mountains)

Within the tertiary hills of the Csérhat-mountains, the city of Salgótarján is located at the bottom and the slopes of a gentle basin-shaped valley. At hill Pecske slightly towards the valley dipping clay-silt-sand strata of the Miocene were cut by different construction activities and rotational sliding resulted. Severe damage on buildings, roads and retaining walls made the movement obvious.

Three clay units can be distinguished: a grey marine clay and the lower and upper coloured freshwater clays. To prove the marine resp. the freshwater character was of importance: a microtexture (preferred orientation of the clay flakes) could be proved by scanning photographs and x-ray diffractometry.

Paleontological features, interlattice cation concentration, fabric and finally soilphysical behaviour showed the both upper clay units (lower and upper coloured clay) to be of freshwater origin. Contrary phenomenons of the grey clay proved its marine depositional environment.

Particularly the shear-strength parameters (triaxial- and direct shear-test) and therefore the factors of safety as well reveal characteristic differences: with the marine clay - unconcerned about the direction of principal stresses - no differences in cohesion and friction angles could be detected. The friction angles of the limnic clay units - obtained with direction of normal stress vertical bedding planes - proved to be lower than those of the grey marine clay, but distinctly higher than those obtained from stress-directions parallel bedding planes.

A distinct trend in both clay types becomes obvious with the tensile-strength behaviour of remoulded samples: with an increase in water content the tensile strength rises as well, until a critical amount of water content is reached and the tensile-strength decreases again.

Whereas the rotational slides at Gödöllö were caused by different petrological features of the clay types - especially the quartz- and montmorillonite-content - the landslide at Salgótarján occurred primarily due to microtextural arrangements of the clay flakes. The mineralogical composition seems to be of minor influence.

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung
 - 1.1. Schadenssituation und Stand der bisherigen Untersuchungen in Gödöllö
 - 1.2. Schadenssituation und Stand der bisherigen Untersuchungen in Salgótarján
 2. Petrographie
 - 2.1. Tone von Gödöllö
 - 2.2. Tone von Salgótarján
 3. Parameter des Sicherheitsfaktors: Kohäsion und Scherwinkel
 - 3.1. Gödöllö, Triaxial- und Zylinderdruckversuch
 - 3.1.1. Triaxiale Scherfestigkeit
 - 3.1.2. Zylinderdruckfestigkeit
 - 3.2. Salgótarján, Triaxial- und Rahmenscherversuch
 4. Standsicherheit der Böschungen
 - 4.1. Sicherheitsfaktoren Gödöllö
 - 4.2. Sicherheitsfaktoren Salgótarján
- Zitierte Literatur

1. Einleitung und Problemstellung

Der Einfluß "geologischer Größen" im weiteren Sinne auf die physikalischen Eigenschaften eines Gesteins bzw. Bodens ist seit jeher bekannt, und sowohl die Planung als auch die Ausführung von Bauwerken jeglicher Art hat im günstigen Falle darauf Rücksicht genommen. So werden - zumindest in der Neuzeit - z.B. Fundamente auf Fels oder Ton unterschiedlich gestaltet und dimensioniert, Stützbauwerke à priori den nach den Baumaßnahmen zu erwartenden Druckverhältnissen angeglichen oder Tunnelbauten bergmännisch im harten Kristallingestein oder frästechnisch in weicheren Sedimenten vorgetrieben und auch unterschiedlich abgesichert.

Diese selbstverständlich klingenden groben Unterscheidungen in harte und weiche Gesteine, in Fels und Boden, in leicht und schwer bearbeitbare, wurden aber z.B. im Mittelalter sicherlich registriert, aber in der Bauplanung und -ausführung kaum berücksichtigt. Es sei in diesem Zusammenhang an die meist überdimensionierten Fundamente und tragenden Elemente mittelalterlicher Kirchen- und Festungsbauten erinnert. Auch bei Kavernen dieser Epoche treten oft die kuriosesten Dimensionierungen und Ausbaumethoden zutage.

In der Bodenmechanik setzt zu Beginn dieses Jahrhunderts eine rapide Entwicklung in der numerischen Erfassung bodenphysikalischer Größen zum Zweck der Berechnung von Fundamenten, Hohlräumen, linear ausgedehnten Baukörpern wie Straßen und Eisenbahnlinien, Stützmauern, Böschungswinkeln etc. etc. ein. Mit einer gewissen Verzögerung folgte dann auch die Felsmechanik im Zugzwang des immer größere Dimensionen annehmenden Felsbaus: noch vor wenigen Jahrzehnten konnte man sich beim Schadensereignis in den meisten Fällen noch darauf berufen, daß es im Felsbau keine Berechnungen gebe und das Verhalten eines Gebirges Ermessenssache, ja in vielen Fällen überhaupt nicht vorauszu- sehen sei. Dies ist heute, wenn auch nicht ausschließlich, so doch im überwiegenden Maß, sowohl im Erd- wie im Felsbau nicht mehr möglich. Allerdings ist man noch weit davon entfernt - und der Inhomogenität des Materials Boden bzw. Fels entsprechend wird man es auch bleiben - Aussagen von ähnlicher Sicherheit zu machen, wie sie im Stahlbau und Stahlbetonbau z.B. selbstverständlich sind.

Fast gleichzeitig mit der Entwicklung der Bodenphysik und Bodenmechanik, die in ersten umfassenderen Werken ihren Niederschlag fand (REDLICH, TERZAGHI, KAMPE, 1929; TERZAGHI, 1943, TAYLOR, 1948 etc. etc.), ging man an die mathematische Verarbeitung bodenphysikalischer Parameter für einen Spezialfall der Materie, die Massenbewegungen an (natürlichen) Hängen und (künstlichen) Böschungen: TERZAGHI, 1950; STRAHLER, 1956; PHILBRICK & CLEAVES, 1958; VARNES, 1958; KÉZDI, 1962; TERZAGHI & PECK, 1967; DEVDARIANI, 1967; ZARUBA & MENZEL, 1969; KÉZDI, 1970; SCHEIDEGGER, 1975; KÉZDI, 1976 etc. etc.

Als natürlicher, wenn auch nicht immer zutreffender Parameter hat sich der Sicherheitsfaktor erwiesen, der aufgrund verschiedener Methoden (s.u.) nach der prinzipiellen Gleichung:

$$V = \frac{M_r}{M_o}$$

errechnet wird, wobei M_r die Summe der resistenten Momente, also z.B. Kohäsion, Reibungswiderstand, passiver Erddruck, statischer Erddruck etc., darstellt und M_o die Summe der gleitungsfördernden Kräfte wie aktiver Erddruck, Porenwasserdruck, Quelldruck etc.

Da die Erfahrung lehrt, daß Rutschungen in bindigen Erdstoffen immer gekrümmte Gleitflächen erzeugen, muß die sogenannte schwedische Methode (FELLENIIUS, 1916 und 1948) als die erste annähernd richtige gewertet werden: bei der Annahme von $\mathcal{P} = 0$, eine Bruchbedingung, wie sie z.B. ein wassergesättigter Ton in geschlossenem System erfüllt, wird der Scherwiderstand ($\mathcal{P} = 0$), der in diesem Fall der Haftfestigkeit gleichzusetzen ist ($\tau = c$), mit der tatsächlich vorhandenen Haftfestigkeit verglichen; daraus ergibt sich die Größe der Sicherheit der Böschung.

Die Untersuchung der Standsicherheit nach dem Lamellenverfahren beruht auf der Berechnung der Standsicherheit abgegrenzter Erdmassen (Lamellen), in die der Gleitkörper zerlegt wird, wobei man zunächst von einer willkürlichen Gleitfläche (Kreis oder Korbbogen) ausgeht und die kritische Gleitfläche dann aufgrund der Ergebnisse mehrerer Annahmen auswählt.

BISHOP (1954 und 1960) hat die Lamellenmethode dahingehend verbessert, indem er auch den auf den Hang einwirkenden Porenwasserdruck miteinbezieht. (Siehe auch KÉZDI, 1970).

TAYLOR (1978) hat eine vereinfachte Methode entwickelt für die Fälle, wo keine neutralen Spannungen auftreten oder wo man nur mit totalen Spannungen rechnen will: die Methode des Reibungskreises. Er hat angenommen, daß auch die Resultierende der elementaren Reibungskräfte, die mit der Gleitflächennormalen den Winkel \mathcal{P} einschließen, den sogenannten Reibungskreis mit dem Radius um den Mittelpunkt O berührt.

Von den die Standsicherheit vor allem beeinflussenden geologischen Größen wie mineralogische Zusammensetzung, Gefüge, Klüftigkeit, Verhältnis des Einfallswinkels zum Böschungswinkel, Verwitterungsgrad, Wasserverfügbarkeit und Wasserwegigkeit etc. etc. wurde in vorliegender Arbeit an Rutschungsbeispielen in Ungarn vor allem die mineralogische Zusammensetzung untersucht und als hauptsächlicher Rutschungsfaktor angesehen, und in einem zweiten Fall wiederum war es das spezielle Mikrogefüge der Tontypen, welche als eigentliche Ursache der Hangbewegung anzusehen sind.

Die besondere Neigung zur Ausbildung von Rutschflächen innerhalb toniger Sedimente wurde schon früh erkannt und richtigerweise

nicht nur der extremen Kleinheit der Tonpartikel (i.a. $< 2 \mu\text{m}$, Montmorillonite $< 0,2 \mu\text{m}$), sondern vor allem auch deren spezifischen physiko-chemischen Eigenschaften zugeschrieben. Hier wiederum ist die Expansionsfähigkeit vor allem von Montmorillonit, Vermiculit und Halloysit längst schon bekannt und in ihren bodenmechanischen Auswirkungen zumindest teilweise studiert worden. Auch Quelldruckerscheinungen wurden quantitativ erfaßt: HOFMANN et al., 1933; MARSHALL, 1935; WHITE, 1949; GRIM, 1953; GRIM, 1962; YONG et al., 1975; MITCHELL, 1976. Aus der russischen Literatur ist ein expandierendes Tonmineral unter der Bezeichnung Gedroizit bekannt. Es handelt sich hierbei offenbar um eine Vermiculit-Varietät, die erstmals von SEDLETSKY (1939 und 1941) beschrieben worden ist.

Daß auch die Anordnung der ultrafeinen Tonplättchen in ihrem Gesteins- oder Lockermassenverband (Mikrotextur bzw. Gefüge) gewissen Gesetzmäßigkeiten aufgrund ihres ursprünglichen Bildungsmilieus unterliegen, wurde mehrfach nachgewiesen: z.B. LAMBE, 1953; ROSENQUIST, 1955; TAN, 1958; VAN OLPHEN, 1963.

Weniger differenziert allerdings sind dann die Untersuchungen hinsichtlich bodenphysikalischer Eigenschaften insbesondere von Atterberg-Grenzen, Scher- und Zugfestigkeit. Auf diesem Gebiet wurde "Ton" insgesamt ohne Rücksicht auf sein Bildungsmilieu, jedoch unter Beachtung von Wassersättigung, Porosität, Korngrößenverteilung etc., studiert. Z.B. LAMBE, 1960; MARTIN, 1963; BISHOP, 1966; ROSCOE, 1967.

Die folgende Arbeit befaßt sich nun schwerpunktmäßig einerseits mit dem Einfluß und der Wechselwirkung der Petrographie bezüglich Atterberg-Grenzen und Scherfestigkeit, wobei sich als exemplarisch die Rotationsgleitungen bei Gödöllö erwiesen haben, und andererseits mit dem Einfluß vor allem der Mikrotextur und nur untergeordnet der Petrographie auf triaxiale und einaxiale Scherfestigkeit, Zugfestigkeit und Atterberg-Grenzen, was sich bei der Hangbewegung in Salgótarján als eigentliche Ursache angeben läßt.

1.1. Schadenssituation und Stand der bisherigen Untersuchungen in Gödöllö

Im Zuge des ungarischen Autobahnausbauprojekts befindet sich unter anderem die Autobahn M 3 im Bau. Sie führt von Budapest in nordöstlicher Richtung nach Miskolc und schließlich zur tschechoslowakischen Grenze. Als internationale Europastraße trägt sie die Bezeichnung E 96. Die Bauarbeiten begannen 1972, und 1978 soll das erste Teilstück zwischen Budapest und km 34 nordöstlich von Gödöllö zunächst als Autostraße mit Gegenverkehr fertiggestellt sein. Mehrere kleinere Rutschungen traten auf, als einige Hügel zum Zweck der möglichst niveaugleichen Trassierung eingeschnitten wurden. Dies vor allem im Baulos D bei km 30 + 500. Weiterhin anhaltende Kriechbewegungen können aufgrund neu beobachteter Risse angenommen werden. Ein nahegelegener Hang, etwa bei km 30 + 900, scheint potentiell kriech-

bzw. rutschungsgefährdet zu sein.

Das geotechnische Institut der Technischen Universität Budapest hat 1974 mit einem Projekt begonnen, das die Sanierung dieser Hangbewegungen zum Inhalt hat. Die folgenden Daten und Schlußfolgerungen sind als Beitrag einer ingenieurgeologisch orientierten Gelände- und Laborarbeit gedacht.

Der Grundstock zu dieser Arbeit entstand während des dreimonatigen UNESCO-Kurses über "Grundlagen und Prinzipien der Ingenieurgeologie" in Budapest im Sommer 1975. 1976 wurden weitere Daten in Ungarn erarbeitet und die 1976 erschienene Studie "Effect of Mineral Composition of Clay Soils on Stability of Slopes from Gödöllő-Road-Cut" entsprechend untermauert und erweitert.

Ich bin den Herren Univ.-Prof. Dr. A. KÉZDI, Univ.-Doz. Dipl.-Ing. I. LAZÁNYI, Dipl.-Ing. Dr. E. BICZÓK und den anderen Assistenten und Laboranten des geotechnischen Instituts wie auch Herrn Dr. I. VICZIAN, Frau M. FÖLDVÁRI und den Laboranten des Ungarischen Geologischen Instituts für ihre wertvolle Hilfe und Ratschläge sehr zu Dank verpflichtet.

1.2. Schadenssituation und Stand der bisherigen Untersuchungen in Salgótarján

Die rapide bevölkerungsmäßige und infrastrukturelle Entwicklung der ehemaligen Bergbaustadt (Braunkohle) Salgótarján im Cserhát-Hügelland in Nordungarn, machte schon vor Jahren die Einbeziehung des heute noch nördlich der Stadt liegenden Pécskö-Hügels in die Überbauungspläne notwendig. Wohnhochhäuser, Sportstätten, eine Hochschule und ein Freilichttheater sollen dort entstehen. Mehrere an der N- und NW-Böschung des Hügels errichtete Wohnhochhäuser stehen seit Jahren, ohne daß eine Hangbewegung festgestellt worden wäre. Erst als beim Bau des Hochhauses Nr. 33 Gebäudeschäden auftraten und schließlich der mehrfache Bruch einer Stützmauer erfolgt war, wurde man auf die Rutschungsgefährdung aufmerksam und betrieb Stabilitätsuntersuchungen. Mit dem Problem wurde das Institut für Geotechnik der Technischen Universität Budapest befaßt und unter dem Titel: "A Salgótarjáni Pécsködomb állékonyasági vizsgálatá" (Stabilitätsuntersuchungen am Pécskö-Hügel in Salgótarján) von A. KÉZDI, E. BICZÓK & B. KLEB ein Gutachten verfaßt. Die im folgenden verwerteten Daten entstammen zum Teil diesem Gutachten. Die übrigen bodenmechanischen Untersuchungen wurden teils in den Bodenmechaniklabors der Technischen Universität Budapest, teils in jenen der Technischen Fakultät der Universität Innsbruck durchgeführt. Über die gefügebedingten bodenphysikalischen Eigenschaften ist 1978 eine Studie erschienen: K. CZURDA: Effect of Environment Dependant Features of Clays on Shear- and Tensile Strength.

Besonders habe ich den Herren Prof. Dr. A. KÉZDI und Dipl.-Ing. Dr. E. BICZÓK vom Geotechnischen Institut der Technischen Universität Budapest für ihre stetige Diskussionsbereitschaft und die wertvollen Hinweise zu danken. Mein Dank gilt auch den

Assistenten und Laboranten dieses Instituts, die mir während meiner Arbeit in Budapest sehr geholfen haben. Die Scanningaufnahmen sind an der ETH Zürich gemacht worden, und ich danke insbesondere Herrn WÄGLI für seine Arbeit.

2. Petrographie

2.1. Tone von Gödöllö

Wie einleitend schon erwähnt, waren es im Fall der Rotationsgleitungen von Gödöllö vor allem petrographische Eigenschaften, die das Ereignis bedingten: hohe Montmorillonitgehalte (65%) im schwarzen Ton, hohe Quarzgehalte (55%) im gelben und bezüglich Montmorillonit und Quarz (48 bzw. 27%) ausgeglichene Werte für den roten Ton.

	schwarzer Ton %	gelber Ton %	roter Ton %
Montmorillonit	68,5	12,0	48,0
Illit	14,5	14,5	14,5
Kaolinit	13,0	8,5 ⁺)	9,0
Quarz	4,0	54,5	26,5
K-Feldspat	-	2,0	1,0
Plagioklas	-	8,5	-
Kalzit	-	-	1,5
Dolomit	-	0,5	-

Tab. 1: durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung der Tone von Gödöllö (Durchschnitt von je 6 Proben)

+) Kaolinit + Chlorit

2.2. Tone von Salgótarján

Im Fall des Böschungsbruchs in Salgótarján waren die bewegungsfördernden Momente (Scherwinkel und Kohäsion) vor allem gefügebedingt. Die quantitative Mineralanalyse der drei Tontypen sei jedoch zum besseren Vergleich mit Gödöllö angeführt:

	grauer Ton marin	u. bunter Ton limnisch	o. bunter Ton limnisch
Montmorillonit	-	11,9	-
Illit/Glimmer	45,0	35,3	41,6
Kaolinit	3,2	11,2	18,0
Fe-Chlorit	27,6	7,1	7,7
Quarz	14,7	22,3	22,5
Plagioklas	6,0	11,0	3,5
Kalzit	1,9	2,0	1,4
Dolomit	1,6	1,8	4,3

Tab. 2: durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung der Tone von Salgótarján (Durchschnitt aus je 8 Proben)

3. Parameter des Sicherheitsfaktors: Kohäsion und Scherwinkel

3.1. Gödöllö, Triaxial- und Zylinderdruckversuch

Jede Berechnung, die Stabilität von Lockermassen oder die Tragfähigkeit betreffend, erfordert die Kenntnis der Scherparameter des Sediments. Im allgemeinen werden für diesen Zweck der Triaxial-, der axiale (Versuch ohne Behinderung der Seitendehnung) und der direkte Scherversuch angewandt.

3.1.1. Triaxiale Scherfestigkeit

Mit den an den Rutschungen beteiligten Tönen wurden in einer Farnell-Triaxialapparatur Scherfestigkeitsmessungen durchgeführt. Getestet wurden je drei Proben der drei Tontypen (Probenreihe Gö 1 schwarz, Gö 2 gelb und Gö 3 rot). Die Schergrade an den Mohrschen Spannungskreisen resultieren aus folgenden Versuchsbedingungen: konstanter Seitendruck $\sigma_3 = 0,5-1,0-2,0$ bar, Geschwindigkeit der axialen Druckaufbringung $\dot{\sigma}_1 = 1$ mm/min.

Die Testergebnisse sind in den Abb. 1, 2 und 3 graphisch in Form von Festigkeits-/Spannungs- und Stauchungs-/Spannungsdiagrammen sowie tabellarisch dargestellt. Der physikalische Zustand (Phasenzusammensetzung) der Proben wurde durch die entsprechenden Volumsprozente an festen Partikeln (V_s), Wasser (V_w) und Luft (V_a) charakterisiert (KEZDI, 1971 und 1976) und in Abb. 4 graphisch dargestellt.

Der Vergleich der Scherfestigkeit der drei getesteten Tontypen zeigt deutlich die Abhängigkeit dieses Werts von der Phasenzusammensetzung und der mineralogischen Zusammensetzung: der quarzhaltigere gelbe Ton mit höherem Feststoffanteil (aber auch höherem Luftporenanteil) ergab einen niedrigeren Scherwinkel ($\phi = 23^\circ$) gegenüber den montmorillonithaltigen roten und schwarzen Tönen ($\phi = 29^\circ$ bzw. 26°). Die Kohäsion des gelben Tons ist zwar gegenüber dem schwarzen doppelt so groß, jedoch fällt der dem schwarzen Ton ähnliche rote Ton aus der Proportion. Da der axiale Druckversuch bezüglich der Kohäsion die mineralogische Verwandtschaft der Tontypen deutlich werden läßt, ist das Herausfallen des roten Tons im Triaxialergebnis am ehesten einem Fehler in der Versuchsdurchführung zuzuschreiben. Tatsächlich ergibt der zweite Test am roten Ton (Gö 3/2; $\sigma_1 = 4,25$, $\sigma_3 = 1,0$) einen Spannungskreis, dessen Tangente steiler geneigt ist, und der somit eine niedrigere Kohäsion - wie zu erwarten gewesen wäre - und einen größeren Scherwinkel zur Folge hätte. Der natürliche Wassergehalt W (Bergfeuchte) der beiden montmorillonitführenden Tone ist ziemlich verschieden: im Schnitt 30% für den schwarzen Ton und 16% für den roten. Dieser Umstand trägt dem höheren Montmorillonitgehalt im schwarzen Ton Rechnung und begründet die relativ hohen Unterschiede in Scherfestigkeit und Kohäsion auch noch zwischen diesen beiden Tönen.

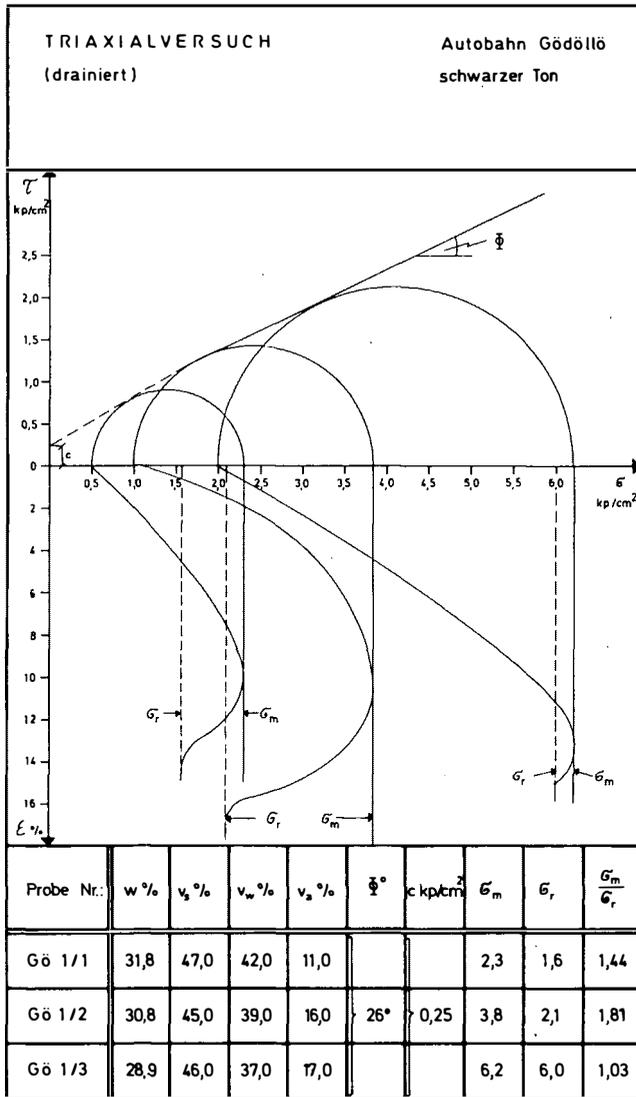


Abb. 1: Gödöllő, schwarzer Ton. Auswertung des Triaxialversuchs im Festigkeits/Spannungs- und Stauchungs/Spannungsdiagramm. Trend zu hoher Restscherfestigkeit wegen des hohen Montmorillonitgehalts. Legende siehe Tabelle 3.

fig. 1: Gödöllő, black clay. Evaluation of triaxial test results. Diagrams: shear strength (τ)/normal stress (σ) and deformation (ϵ)/normal stress. Trend towards high residual strength because of high montmorillonite contents.

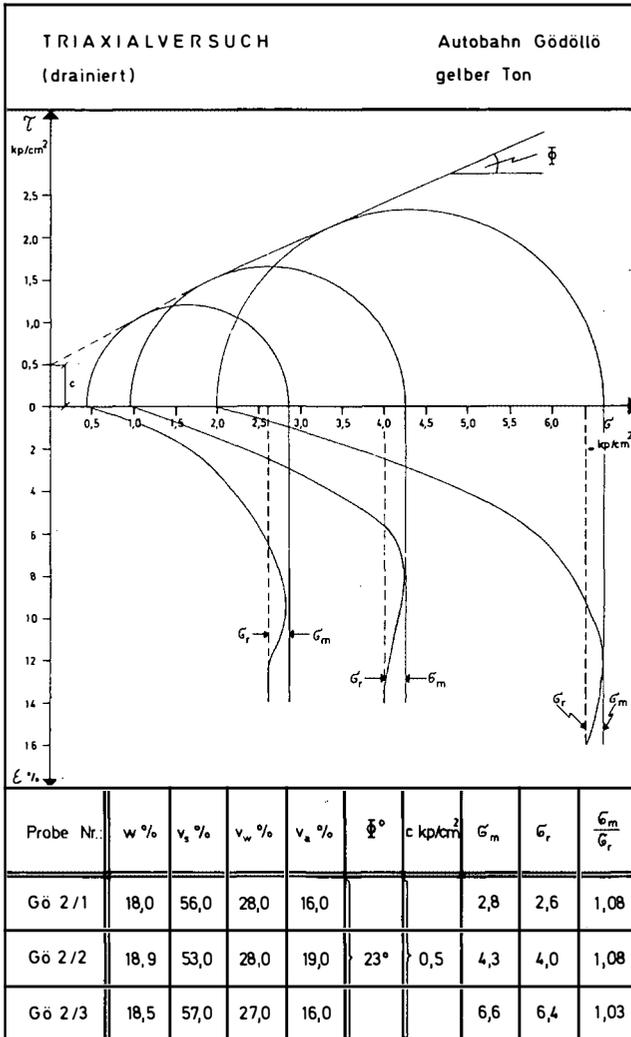


Abb. 2: Gödöllő, gelber Ton. Auswertung des Triaxialversuchs im Festigkeits/Spannungs- und Stauchungs/Spannungsdiagramm. Trend zu niedriger Restscherfestigkeit wegen des hohen Quarzgehalts. Legende siehe Tabelle 3.

fig. 2: Gödöllő, yellow clay. Evaluation of triaxial testresults. Diagrams: shear strength (τ)/normal stress (σ) and deformation (ϵ)/normal stress. Trend towards low residual strength because of high quartz contents.

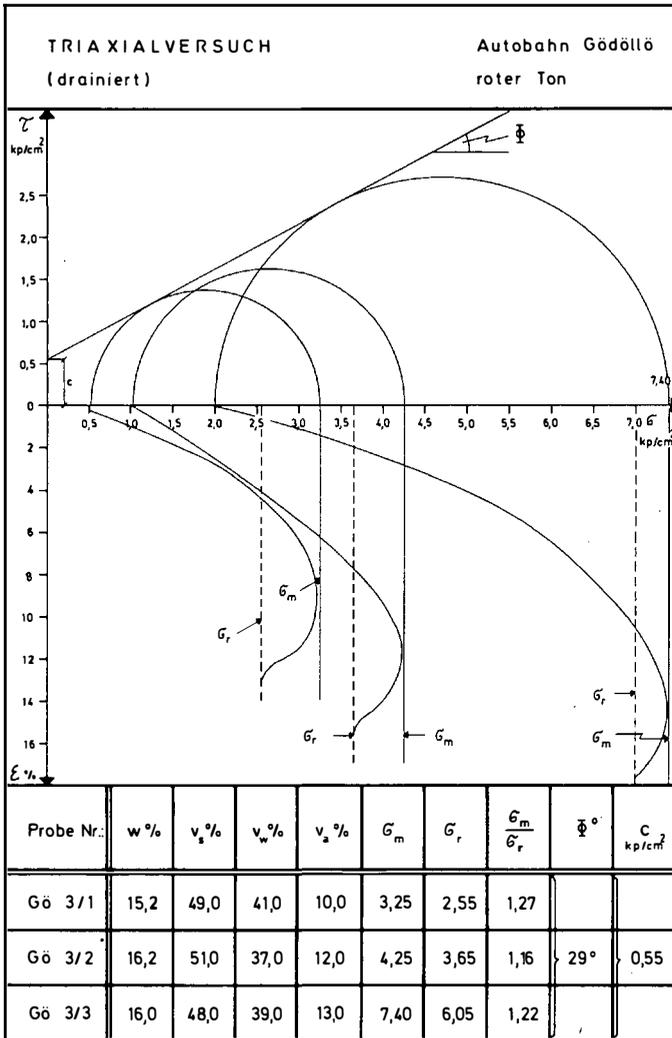


Abb. 3: Gödöllő, roter Ton. Auswertung des Triaxialversuchs im Festigkeits/Spannungs- und Stauchungs/Spannungsdiagramm. Legende siehe Tabelle 3.

fig. 3: Gödöllő, red clay. Evaluation of triaxial test results. Diagrams: shear strength (τ)/normal stress (σ) and deformation (ε)/normal stress.

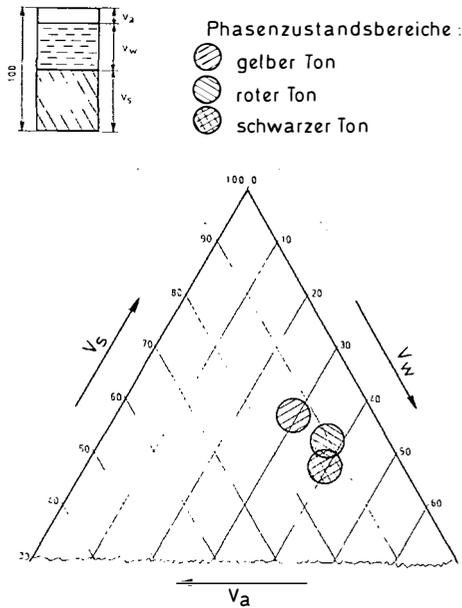


Abb. 4: Phasenzustandsbereiche der Tone von Gödöllő im Dreiecksdiagramm. Markante Unterschiede im Wassergehalt zwischen gelbem und schwarzem Ton. Legende siehe Tabelle 3.

fig. 4: Areas of phase composition of original clay samples from Gödöllő within the triangle diagram. Marked differences of natural moisture content between the yellow and the black clay. V_s = volume percent solid-, V_w = volume percent liquid-, V_a = volume percent gaseous phase.

LEGENDE :

zu den Abbildungen 1, 2, 3, 4 und 5

- τ = Scherfestigkeit (maßgebende Scherspannung)
- σ = Normalspannung (totale Spannung in der Schnittfläche)
- ϕ = innerer Reibungswinkel
- c = Kohäsion (Haftfestigkeit)
- ϵ = spezifische Zusammendrückung
- r_m = maximale Scherfestigkeit im ungestörten Zustand
- r_s = minimale Scherfestigkeit nach dem Bruch
- w = Bergfeuchte, Gewichtsprozent
- V_s = Volumsanteil feste Phase
- V_w = Volumsanteil flüssige Phase
- V_a = Volumsanteil gasförmige Phase
- σ = Druckspannung = P/F (P = axiale Belastung, F = Kreisfläche des Probenzylinders)
- q_u = einaxiale Druckfestigkeit

Tab. 3: Legende zu den Abbildungen 1 bis 5

3.1.2. Zylinderdruckfestigkeit (einaxiale Kompression)

Ein Spezialfall der triaxialen Abscherung ist der Druckversuch mit freier Seitendehnung, in welchem $\sigma_3 = 0$ ist. Wie im Triaxialversuch und ungleich dem direkten Scherversuch, ist die Bruchebene nicht vorgegeben. Falls nicht der Zustand der plastischen Deformation eintritt, schert der Probenzylinder an seiner schwächsten Stelle ab. Im Fall der plastischen Deformation buchtet der Probenzylinder seitlich aus, und definitionsgemäß wird die Scherfestigkeit bei einem Deformationsausmaß (Y) von 20% als Bruchfestigkeit gewertet.

Der Zylinderdruckversuch wird, da schnell und ökonomisch, häufig angewandt, um annähernd die Scherfestigkeit bindiger Böden zu bestimmen. Es sei aber hervorgehoben, daß - obwohl der Versuch nur Näherungswerte erbringt - kaum eine andere Methode bessere Resultate erzielt, es sei denn, der Versuchs- und apparative Aufwand wird erheblich gesteigert. Die Werte sind ausreichend genau, wenn man die bekannten Unzulänglichkeiten einkalkuliert; z.B. den Effekt der seitlichen Stützung durch umgebende Erdmassen (was im Triaxialversuch simuliert wird).

Lediglich die drei Tontypen von Gödöllő wurden mit je einem Versuch (was für eine schlüssige Aussage zuwenig ist) getestet. Es wurde erneut die Farnell-Apparatur verwendet und der axiale Druck mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min gesteigert. In Abb. 5 sind die Testergebnisse graphisch im Druckstauchungsdiagramm dargestellt. Die Mohrschen Spannungskreise sollen das Zustandekommen der Bruchfestigkeitswerte verdeutlichen:

$$q_u = \sigma(\text{Bruch})$$

$$c = \frac{q_u}{2}$$

Das in den Triaxialresultaten etwas verzerrte Ergebnis bezüglich der Kohäsion ergibt im Kompressionsversuch die richtige Proportion: der höchste Kohäsionswert, nämlich 1,50 bar, definitionsgemäß gekoppelt mit dem höchsten Bruchwert, kommt dem siltigen gelben Ton zu, während die roten und schwarzen Tone, entsprechend ihrem unterschiedlichen Gehalt an Montmorillonit, geringere Festigkeiten und Kohäsionswerte erreichen.

Die Festigkeitswerte aus dem Zylinderdruckversuch sind eine Funktion der Form und absoluten Größe des Probenkörpers, wie mehrfach nachgewiesen wurde (KEZDI, 1973). Die Bedeutung des Versuchs liegt daher in erster Linie darin, daß dadurch relative Vergleichswerte gewonnen werden können. Ungleich den Abmessungen, z.B. der Casagrande-Scherbüchse oder des Probenkörpers für den Triaxialversuch, sind die Abmessungen des Probenzylinders für den einaxialen Kompressionsversuch nicht genormt!

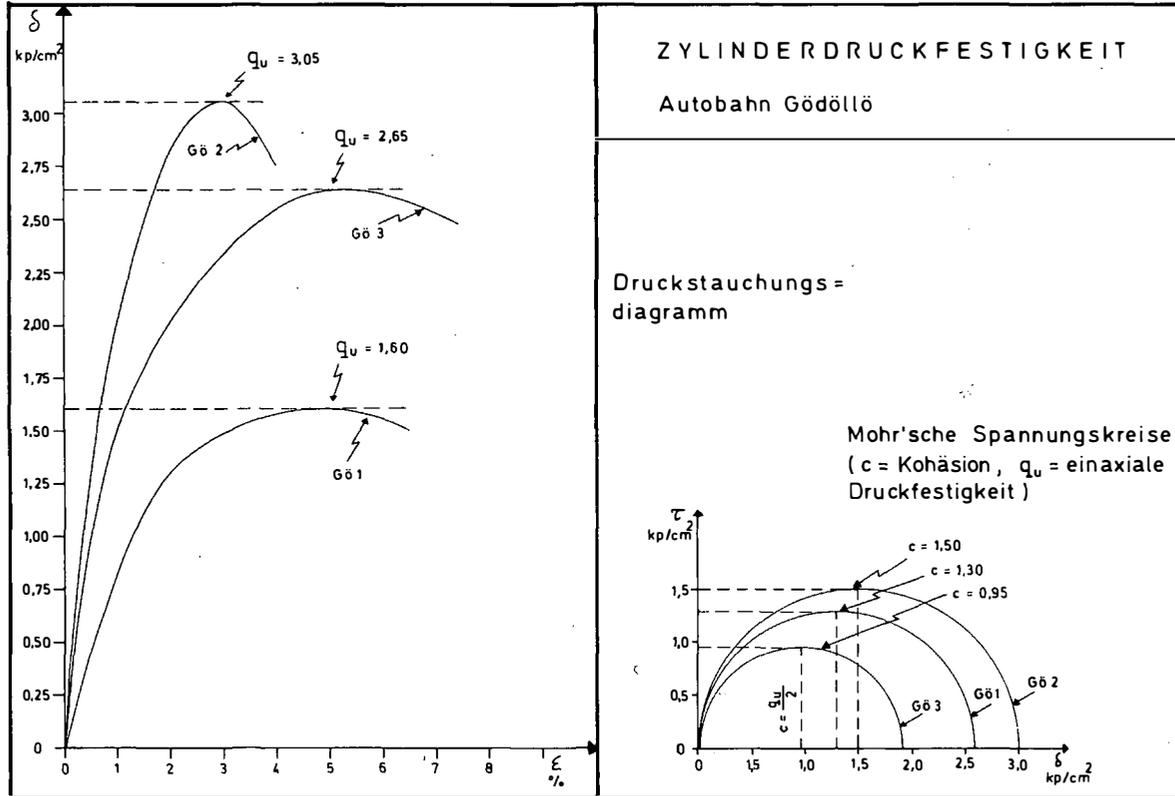


Abb. 5: Gödöllő, Auswertung der Zylinderdruckversuche im Druckstauchungsdiagramm. Ermittlung der Kohäsion (c) und der einaxialen Druckfestigkeit (q_u). Legende siehe Tabelle 3.

fig. 5: Gödöllő, evaluation of uniaxial compression tests: strength-deformation-diagram. Determination of cohesion (c) and axial shear strength (q_u).

3.2. Salgótarján, Triaxial- und Rahmenscherversuch

Der Ton eines bestimmten Ablagerungsraums ist charakterisiert durch die Art und Menge der Tonminerale, die Art seiner austauschbaren Kationen und die Textur der Tonmineralplättchen. Letzteres ist auch für die Scherfestigkeit eines tonigen Sediments verantwortlich.

Wenn für die marinen Tone eine flokkulierte Kartenhausstruktur und für die Süßwassertone eine dispergierte Parallelregelung angenommen wird, so ergeben sich daraus Konsequenzen für die Scherfestigkeit, die sich kaum in der Kohäsion, jedoch in bestimmten Scherwinkelgruppen niederschlagen.

Mit den Süßwassertonen und dem marinen Ton von Salgótarján wurden Triaxial- und Rahmenscherversuche durchgeführt. Die Scherparameter erwiesen sich als richtungabhängig (texturbedingt), die Textur konnte als Folge des primären Ablagerungsmilieus und des Überlagerungsdrucks nachgewiesen werden (CZURDA, 1978). Die Beschreibung der Versuchsdurchführung und der Nachweis der Textur sind in vorzitiertem Arbeit enthalten. Die Ergebnisse bezüglich der Scherparameter, als Koeffizienten des Sicherheitsfaktors, seien in nachfolgender Tabelle 4 zusammengefaßt:

	mariner Ton		limnischer Ton	
	$\sigma_1 \perp ss$	$\sigma_1 // ss$	$\sigma_1 \perp ss$	$\sigma_1 // ss$
Anzahl der Messungen	21	21	24	17
Reibungswinkel ϕ aus Triaxialversuch. Häufung über 50%	30-40°	30-40°	20-30°	0-20°
Anzahl der Messungen	8	8	8	8
Scherwinkel ϕ_1 aus Rahmenscherversuch	27-29°	24-25°	35-42°	18-20°
Kohäsion c_u aus Rahmenscherversuch	0,20-0,24 bar	0,04-0,10 bar	0,04-0,10 bar	0,10-0,16 bar

Tabelle 4: Differenzierung des marinen und limnischen Tons durch Triaxial- und Rahmenscherparameter.

4. Standsicherheit der Böschungen

In beiden untersuchten Fällen (Gödöllö und Salgótarján) sind geschichtete tonig-schluffige Erdmassen an kreisbogenförmigen Gleitlinien abgerutscht. In Gödöllö kamen künstlich hergestellte Böschungen in Bewegung, in Salgótarján natürliche Böschungen, und man spricht daher in beiden Fällen von Böschungsbruch vom Typ Rotationsgleitung.

Die Bewegung der Erdmassen erfolgt längs der ungünstigsten Gleitfläche, und die Sicherheit resultiert aus dem Widerstand der als starr angenommenen Erdscheibe gegen Verdrehen. Die Lage der sogenannten kritischen Gleitfläche muß bestimmt werden. Das ist diejenige Gleitfläche, in welcher der Scherwiderstand, bei dem die Rutschung gerade noch nicht eintritt, am größten ist. Zur Berechnung kann man die an der Erdscheibe angreifenden Kräfte zu Resultierenden zusammenfassen oder den Rutschkörper in Lamellen unterteilen und die Kräfte für die einzelnen Lamellen bestimmen. Die gängigsten Berechnungsverfahren wurden überblicksmäßig mit genereller Funktionsweise in der Einleitung beschrieben.

Die meisten Autoren stimmen darin überein, daß der Wert des Sicherheitsfaktors mit Hilfe der Scherfestigkeit - definiert als Verhältnis der vorhandenen zur erforderlichen Scherfestigkeit - ausgedrückt werden muß, um das Gleichgewicht erfassen zu können (TAYLOR, 1948; BISHOP, 1954; KÉZDI, 1959, 1970). Hiebei ist die Scherfestigkeit durch folgende Gleichung gegeben:

$$\tau_s = \bar{\sigma} \tan \rho' + c' = (\sigma - u) \tan \rho' + c'$$

Wenn die verschiedenen Scherfestigkeitswerte entlang der Gleitfläche bekannt sind, dann kann der kleinste Wert der Gleichung

$$(\text{Sicherheitsfaktor}) \quad \gamma = \frac{\tau_s}{\tau} \quad \begin{array}{l} \text{(Bruchfestigkeit)} \\ \text{(Scherfestigkeit,} \\ \text{vorhanden)} \end{array}$$

als Sicherheitsfaktor angegeben werden. Da aber sowohl τ_s als auch τ von der Normalkraft σ abhängen, kann dieses Verhältnis solange nicht die effektive Sicherheit angeben, solange nicht die Verteilung der σ - und τ -Werte entlang der Gleitfläche bekannt ist. Es muß weiterhin in Betracht gezogen werden, daß die Scherfestigkeit eines Gesteins nicht durch konstante ρ' - und c' -Werte charakterisiert werden kann, sondern daß normalerweise ein mehr oder weniger weiter Streubereich an Meßwerten einkalkuliert werden muß.

4.1. Sicherheitsfaktoren, Gödöllő

Die Höhe der Böschung beträgt 7 m, die Neigung beträgt $\text{ctg } \beta = 1,2$, die Scherfestigkeitswerte:

schwarzer Ton $\varphi = 26^\circ$, $c = 0,25$ bar (Abb. 1)
gelber Ton $\varphi = 23^\circ$, $c = 0,50$ bar (Abb. 2)
roter Ton $\varphi = 29^\circ$, $c = 0,55$ bar (Abb. 3)

Mehrere Kreisgleitflächen wurden unter Zugrundelegung nachstehender Wertepaare (φ und c), für die sich die Böschung im Grenzgleichgewicht befindet ($v = 1$), untersucht (KÉZDI, 1970):

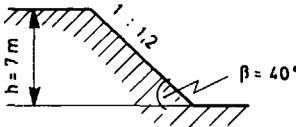
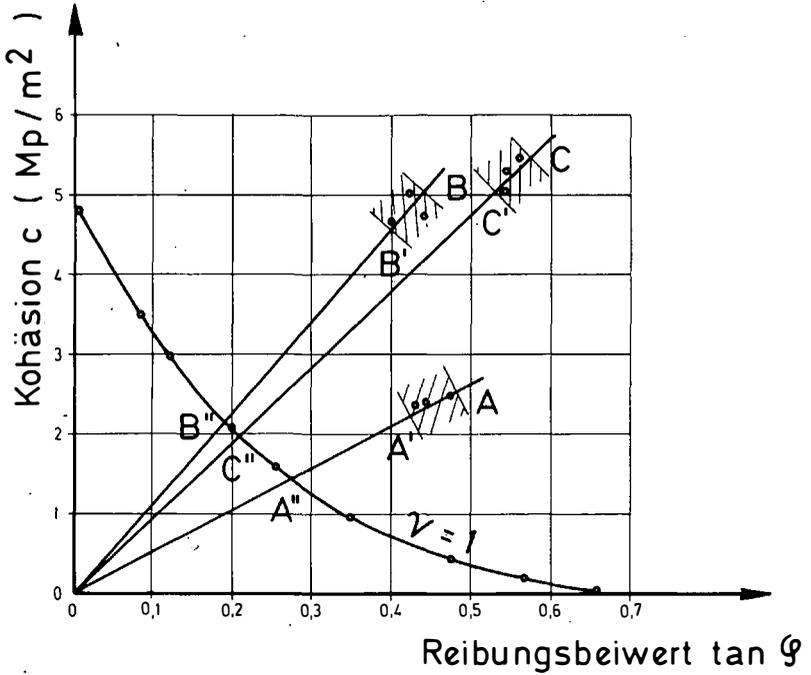
φ°	$\tan \varphi$	c (bar)
0	0,0	0,48
5	0,087	0,35
10	0,176	0,25
15	0,268	0,17
20	0,364	0,10
25	0,466	0,05
30	0,577	0,02
33°40'	0,667	0,00

Tabelle 5: Wertepaare $\tan \varphi$ und c , für die sich die Böschung im Grenzgleichgewicht ($v = 1$) befindet.

Diese Werte wurden im Diagramm $c/\tan \varphi$ (Abb. 6) aufgetragen. Die aus den einzelnen Punkten gewonnene Kurve teilt die Koordinatenebene in zwei Bereiche: jeder Punkt über der Kurve entspricht den Parameter der Scherfestigkeit, bei denen die Böschung standfest ist, jeder Punkt auf der Kurve stellt eine Coulombsche Linie dar.

Je drei Durchschnittswerte aus neun je Toneinheit durchgeführten Triaxialversuchen ergeben die Abgrenzung eines Streubereichs mit einem minimalen und einem maximalen Sicherheitsfaktor (siehe Abb. 6).

Wie schon aus der petrologischen Analyse und den bodenmechanischen Kennwerten zu erwarten war, kann hiemit zahlenmäßig anhand der Sicherheitsfaktoren die Standsicherheit der drei analysierten Tontypen in tabellarischer Form (zur graphischen Darstellung in Abb. 6) und in abnehmender Reihenfolge angegeben werden:



$$\left. \begin{aligned}
 \gamma_{\varphi} &= \frac{\text{vorh. } \tan \varphi}{\text{erf. } \tan \varphi} \\
 \gamma_c &= \frac{\text{vorh. } c}{\text{erf. } c}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 \gamma_{\varphi} &= \gamma_c = \gamma_{\bar{\gamma}} \\
 \max \gamma_{\bar{\gamma}} &= \frac{0(A, B, C)}{0(A'', B'', C'')} \\
 \min \gamma_{\bar{\gamma}} &= \frac{0(A', B', C')}{0(A'', B'', C'')}
 \end{aligned}$$

Abb. 6: Tone von Gödöllö. Streubereiche der Sicherheitsfaktoren (γ). A = schwarzer Ton, B = gelber Ton, C = roter Ton. Erläuterung im Text.

fig. 6: Gödöllö clays. Extent of scattering of factors of safety (γ). A = black clay, B = yellow clay, C = red clay. Highest susceptibility for sliding shows the black clay area.

	φ^0	$\tan \varphi$	c (bar)	ν_{τ}
A, schwarzer Ton	26 ⁰ 24 ⁰ 23 ⁰	0,488 0,445 0,424	0,25 0,24 0,23	1,80 1,70 1,60
B, roter Ton	23 ⁰ 23 ⁰ 50' 21 ⁰ 50'	0,424 0,442 0,401	0,50 0,48 0,47	2,30 2,20 2,10
C, gelber Ton	29 ⁰ 28 ⁰ 28 ⁰	0,554 0,532 0,532	0,55 0,54 0,51	2,70 2,60 2,60

Tabelle 6: Sicherheitsfaktoren aus dem $\tan \varphi/c$ -System der drei Tontypen mit Streubereichen aufgrund unterschiedlicher triaxialer Testergebnisse.

Die größte Gleitneigung ist somit dem schwarzen (montmorillonitreichsten und quarzärmsten) Ton und die geringste dem gelben (quarzreichsten und montmorillonitärmsten) zuzuschreiben. Daß die Rotationsgleitungen in einer Wechselfolge von schwarzem Ton, gelbem Ton und Schluff erfolgte, ist natürlich dem "schwächsten" Glied, dem schwarzen Montmorillonit-Ton, zuzuschreiben. Die nur aus rotem Ton aufgebauten Böschungen weisen daher eine wesentlich bessere Standsicherheit auf, trotz des im Vergleich zum gelben Ton hohen Montmorillonitgehalts.

4.2. Sicherheitsfaktoren, Salgótarján

Stabilitätsuntersuchungen mit Berechnung der Sicherheitsfaktoren sind von KÉZDI, FARKAS und KABAI (1976) zu verschiedenen Zeitpunkten und somit unterschiedlichen Gleichgewichtsbedingungen gemacht worden.

In Abb. 7 ist das Schema zur Berechnung des Sicherheitsfaktors im Fall des Geländebruchs am Pécskö-Hügel dargestellt und der Sicherheitsfaktor wie folgt berechnet:

$$\nu = \frac{E_p \cos \xi + G \cos \tan \varphi + c_1}{E_a \cos (\delta - \xi) + G \sin \xi}$$

Streubereiche der triaxialen Scherparameter der einzelnen Tontypen zeigen folgenden Trend:

- a) Mariner Ton: gleichgültig, welche Richtung der axialen Druckaufbringung (σ_1) gewählt wurde, die hohen Scherwinkelwerte sind mit relativ hoher Kohäsion gekoppelt und zeigen vor allem keine signifikanten Unterschiede senkrecht bzw. parallel zur Schichtung.
- b) Limnischer Ton, $\sigma_1 \perp ss$: relativ hohe Scherwinkelwerte bei breiter Streuung der Kohäsionskräfte zeichnen die Druckrichtung senkrecht zur Schichtung dieses Tons mit ausgeprägtem Richtungsgefüge aus.

Mariner Ton jeglicher Druckrichtung und limnischer Ton bei $\sigma_1 \perp ss$ liegen jedenfalls im standsicheren Bereich, gleichgültig der vorgegebenen Annahme der Koeffizienten für den Erdruchdruck ($K_0 = 1$ oder $0,5$).

- c) Limnischer Ton, $\sigma_1 // ss$: die meisten Werte kommen sowohl bei Annahme von $K_0 = 1$ als auch von $K_0 = 0,5$ unterhalb oder knapp an den Sicherheitsfaktor $v = 1$ zu liegen. Daß es innerhalb der limnischen Tone zu Gleitungen kommen muß, läßt sich somit auch anhand der Sicherheitsfaktoren verdeutlichen.

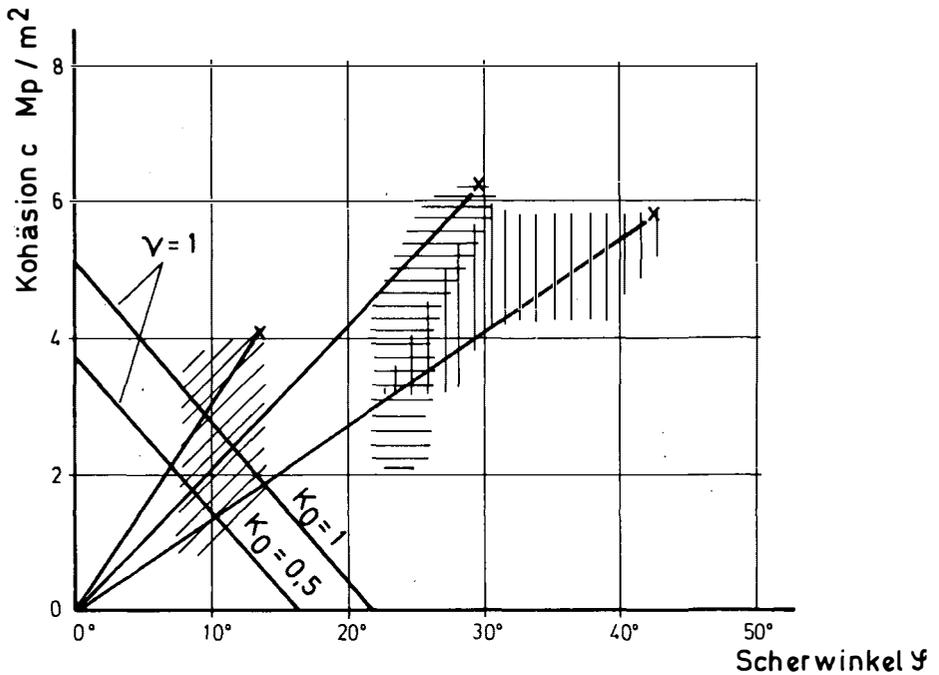


Abb. 8: Salgótarján. Abhängigkeit der Scherparameter im Zustand des Grenzgleichgewichts ($\nu = 1$) von zwei verschiedenen Werten des Erdruhedrucks K_0 (nach KÉZDI, FARKAS & KABAI). Streubereiche der gemessenen Scherparameterhäufungen:

- limnischer Ton (bunter Ton), $\sigma_1 // ss$
- limnischer Ton (bunter Ton), $\sigma_1 \perp ss$
- mariner Ton (grauer Ton), σ_1 in beliebiger Richtung ohne Häufigkeitsmaxima.

fig. 8: Salgótarján. Function of shear parameters in state of equilibrium ($\nu = 1$) from two different values of static earth pressure (K_0) according to KÉZDI, FARKAS & KABAI. Extent of scattering of the shear parameters:

- freshwater clay (coloured clay), $\sigma_1 // ss$
- freshwater clay (coloured clay), $\sigma_1 \perp ss$
- marine clay (grey clay), σ_1 in any direction without maxima of accumulation.



Abb. 9: Salgótarján. Durch Hangrutschung zerstörte Stützmauer und Gebäudeschäden.

fig. 9: Salgótarján. Retaining wall and buildings damaged by the landslide.



Abb. 10: Salgótarján. Durch Hangrutschung zerstörte Stützmauer und im Bau befindliche Wohnhochhäuser.

fig. 10: Salgótarján. By the landslide broken retaining wall and apartment buildings under construction.

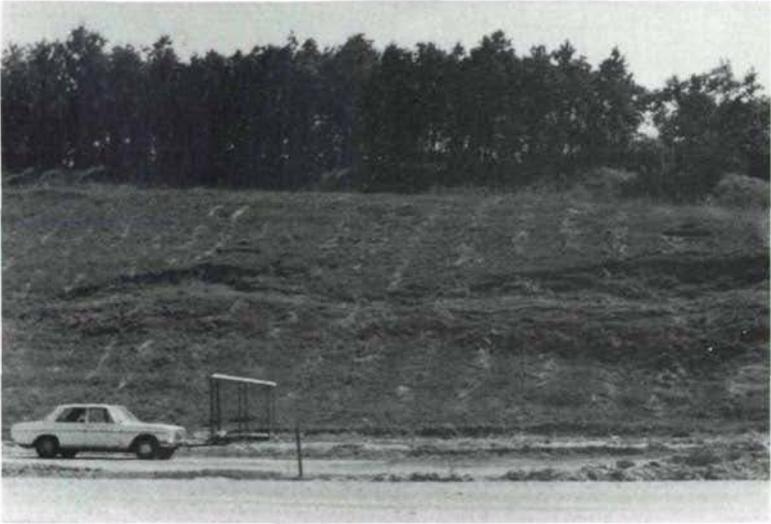
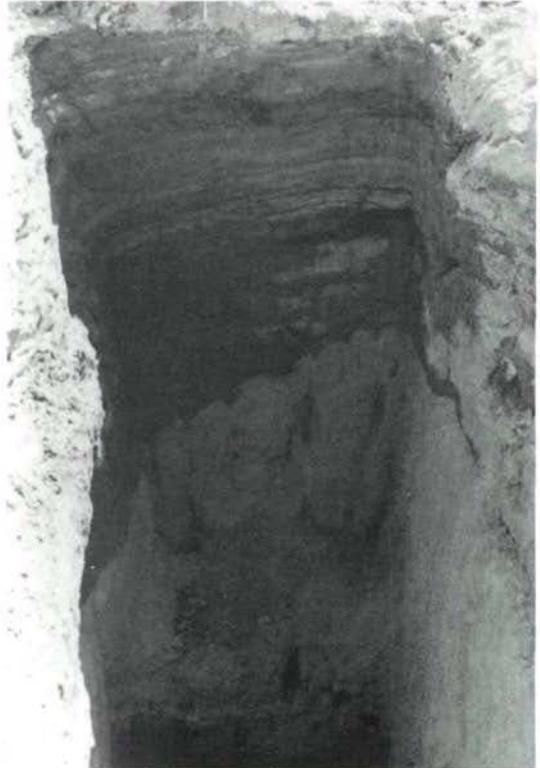


Abb. 11: Gödöllő. Autobahn E 96 bei km 30,5. Rotationsgleitungen im schwarzen und gelben Tertiärton an einer künstlichen Böschung. Aufgenommen August 1975.

fig. 11: Gödöllő. Highway E 96 at km 30.5. Rotational slides within black and yellow tertiary clays. Man-made slope. Picture taken 1975.

Abb. 12:
Gödöllő. Autobahn E 96 bei km 30,5. Erkundungsschacht am Fuß der Rutschung. Der Aufschluß stellt die Ton-Sandwechselfolge liegend des schwarzen Tons dar. Die Durchfeuchtung reicht bis zu einem tektonisch begrenzten Tonkörper im Liegenden.

fig. 12:
Gödöllő. Highway E 96 at km 30.5. Investigation shaft below the landslide. The outcrop shows the clay-sand interstratification below the black clay. The soaking goes until a tectonically marked boundary of a clay mass below.



Zitierte Literatur

- ATTEWELL, P.B. & I.W. FARMER (1976): Principles of Engineering Geology. - Chapman & Hall, London.
- AYLMORE, L.A.G. & J.P. QUIRK (1962): The structural status of clay systems.-Clays and Clay Minerals. -Proceedings of the 9th National Conference pp. 104-130.
- BISHOP, A.W.(1954): The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. - Proc. European Conf. on Stability of Earth Slopes, Stockholm, Vol. 1.
- BISHOP, A.W. (1966): Strength of soils as engineering materials. - 6th Rankine Lecture, Géotechnique, 16: 89-130.
- BISHOP, A.W. & N.R. MORGENSTERN (1960): Stability coefficiente for earth slopes. - Géotechnique 10.
- CZURDA, K. (1976): Effect of Mineral Composition of Clay Soils on Stability of Slopes from Gödöllő-Road-Cut. - Series of Final Papers, UNESCO-course of Engineering Geology, Budapest.
- CZURDA, K. (1978): Effect of Environment dependant features of clays on shear- and tensile strength. - Proceedings III. Int.Congr. I.A.E.G., Sec. II, Vol. 1, Madrid.
- CZURDA, K. & R.M. QUIGLEY (1973): Cracking of a concrete tunnel in the Meaford-Dundas formation, Mississauga, Ontario. - Research Report Engineering Science, UWO SM-3-73 London/Canada.
- DIAMOND, S. (1971): Microstructure and pore structure of impact-compacted clays. - Clays ans Clay Minerals, 19.
- FELLENIUS (1948): Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion und unter der Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen. - Berlin.
- GILLOTT, J.E. (1968): Clay in Engineering Geology. - Elsevier, Amsterdam.
- GILLOTT, J.E. (1970): Fabric of Leda Clay Investigated by Optical, Electron Optical, and X-ray Diffraction Methods. - Eng. Geology, Vol. 4, No. 2.
- KÉZDI, A. (1969): Handbuch der Bodenmechanik, Bd. 1, Bodenphysik. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- KÉZDI, A. (1970): Handbruch der Bodenmechanik, Bd. 2, Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau. Akadémiai Kiodó, Budapest.
- KÉZDI, A. (1973): Handburch der Bodenmechanik, Bd. 3, Bodenmechanisches Versuchswesen. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- KÉZDI, A. et al. (1971): Strength of transition soils. - Proc. 4th Conf. on Soil Mechanics, Budapest.
- KÉZDI, A. & E. BICZÖK (1976): " A Salgótarjáni Pécskö-domb állékonyasági vizsgátala".-(Stabilitätsuntersuchungen am Pécskö-Hügel in Salgótarján; Bericht des Geotechnischen Instituts der BME Budapest).
- KÉZDI, A.; FARKAS, J. & I. KABAI (1976): Landslide in a road in a residential area. - Proc. 5th Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Budapest.
- KÉZDI, A. & G. HÖRVATH (1973): Tensile and flexural strength on cohesive soils. - Acta Technica Acad. Sc. Hungaricae, Tom. 74 (1-2), Budapest.
- LAMBE, T.W. (1953): The structure of inorganic soils. - Amer. Soc.Civ.Eng.; Proc., 79.
- LAMBE, T.W. (1960): A Mechanistic Picture of Shear Strength in Clay. - Res.Conf.Sheer Strength of Cohesive Soils, ASCE, S. 555/80.

- MARSHALL, C.E. (1935): Layer Lattices and Base-Exchange Clays, Z. Krist., 91, 433-449.
- MITCHELL, J.K. (1976): Fundamentals of Soil Behaviour. - Wiley & Sons, New York.
- VAN OLPHEN, H. (1963): An Introduction to Clay Colloid Chemistry. - Interscience Publishers, New York.
- PHILBRICK, S.S. & CLEAVES, A.B. (1958): Field and Laboratory Investigations. In Landslides and Engineering Practice. - Highway Research Board, Special Report 29.
- QUIGLEY, R.M. & T. OGUNBADEJO (1972): Clay layer fabric and oedometer consolidation of a soft varved clay. - Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, 2, Ottawa.
- REDLICH, K.A.; TERZAGHI, K. & R. KAMPE (1929): Ingenieurgeologie. - Springer, Wien.
- RIEKE III, H.H. & G.V. CHILINGARIAN (1974): Compaction of Argillaceous Sediments; Elsevier, Amsterdam.
- RISCHAK, G. & I. VICZIAN (1972): Mineralogical factors determining the intensity of basal reflections of clay minerals. - Annual Report of Hungarian Geological Institute, Budapest.
- ROSCOE, K.H. (1967): Behandlung bodenmechanischer Probleme auf der Grundlage neuerer Forschungsergebnisse. - Bergbauwiss. 14, Nr. 12, S. 464/72; 15, Nr. 1, S. 8/14.
- ROSENQUIST, I.Th. (1955): Investigations in the clay-electrolyte-water-system. - Norweg. Geotechn. Inst. Publ., 9, Oslo.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1975): Physical aspects of natural catastrophes. - Elsevier, Amsterdam.
- SEDLITZKY, I.D. (1939): Gedroizite in the Alkali-Soils. - Compt.rend.acad.sci.USSR 23, 565-568.
- SKEMPTON, A.W. & J. HUTCHINSON (1969): Stability of natural slopes and embankment foundations. - Proc. 7th Conf. on Soil Mechanics and Foundations, Mexico City.
- STRAHLER, A.N. (1956): Quantitative Slope Analysis. - Bull. Geol.Soc.Am., vol. 63, pp. 571-595.
- TAN, T.K. (1958): Discussion of Soil Properties and their measurement. - Proc. Intern. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 4th ed.
- TAYLOR, D.W. (1948): Fundamentals of Soil Mechanics. - J. Wiley, New York.
- TERZAGHI, K. (1943): Theoretical Soil Mechanics. - Wiley, New York.
- TERZAGHI, K. (1950): Mechanism of landslides. In: Application of geology to engineering practice (Berkley volume). - Geol.Soc.America, New York.
- TERZAGHI, K. & R.B. PECK (1967): Soil Mechanics in Engineering Practice. - 2nd ed. Wiley, New York.
- VARNES, D.J. (1958): Landslide types and processes. - Landslides and engineering practice, Highway Research.
- YONG, R.N. & B.P. WARKENTIN (1975): Soil Properties and Behaviour. - Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 5, Elsevier, Amsterdam.
- YOSHINAKA, R. & H. KAZAMA (1973): Microstructure of Compacted Kaolin Clay. - Soils and Foundations, Vol. 13, No. 2
- ZARUBA, O. & V. MENZEL (1969): Landslides and their control. - Acad. Praha, pp. 205.