

N° 96	MITTEILUNGEN der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik PUBLICATIONS de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches
	Frühjahrstagung 1977, 13. Mai, Luzern – Session de printemps 1977, 13 mai, Lucerne

DEFORMATIONSMODULN DER MERGELSCHIEFER DER FLYSCHSERIE UND DES VERLEHMTE GEHÄNGESCHUTTES. VERGLEICHE ZWISCHEN DILATOMETER-, LASTPLATTEN- UND DRUCKVERSUCHEN.*

Von Dr. A. Thut, Zürich



1. EINLEITUNG

Im Zusammenhang mit der Sondierkampagne für das Lehnviadukt Beckenried wurden in der Zeitspanne zwischen April 1974 und April 1975 in insgesamt 8 Bohrungen Dilatometerversuche zur Ermittlung der Deformationsmoduln des Mergelschiefers der Flyschserie und des verlehmtten Gehängeschutttes durchgeführt. Sie erfolgten im Auftrage der Baudirektion des Kantons Nidwalden, Stans und in Zusammenarbeit mit dem geologischen Büro Dr. T.R. Schneider, Uerikon durch die SOLEXPERTS AG, Zürich.

Mit der systematischen Anordnung der Versuche (23 Versuche im Fels und 5 Versuche im Lockergestein) konnte ein guter Aufschluss über die Deformationsmoduln der geologischen Formation und über den Einfluss der Klüftigkeit auf den Deformationsmodul im Flysch erreicht werden. Mit Druckversuchen in verschiedenen Richtungen zur Schichtung der Mergelschiefer konnte die Anisotropie bezüglich der Deformationsmoduln untersucht werden. Die Vergleiche der in-situ Versuche mit den Laborversuchen zeigten im kompakten, nicht klüftigen Mergelschiefer eine gute Uebereinstimmung.

Im Bereich des Gehängelehmes können die Dilatometerversuche mit den Resultaten von Lastplattenversuchen verglichen werden. Die Lastplattenversuche wurden durch das Kantonsingenieurbüro Nidwalden in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. R. Mengis, Luzern durchgeführt.

2. BESCHREIBUNG DES DILATOMETERS

Die Abb. 1 zeigt den Dilatometer vor dem Absenken ins Bohrloch. Das Gerät besteht aus der Sonde (links im Bild) die am Ende des Koaxialkabels in ein Bohrloch (Durchmesser 101 mm) bis zur gewünschten Tiefe gebracht wird. Die vorhandene Ausrüstung erlaubt Versuche bis zu einer Tiefe von 150 m durchzuführen. In Beckenried betrug die maximale Tiefe 46,30 m. Mit Hilfe von zusätzlichen Verlängerungskabeln können problemlos auch grössere Tiefen erreicht werden.

In der Sonde befinden sich, in einem Gehäuse geführt, 3 um je 120° versetzte Extensometer zur Messung der Deformationen während der Laststeigerung. Die Distanz zwischen den Extensometern beträgt 75 mm. Die Ableseung der Deformationen erfolgt an der Messbrücke.

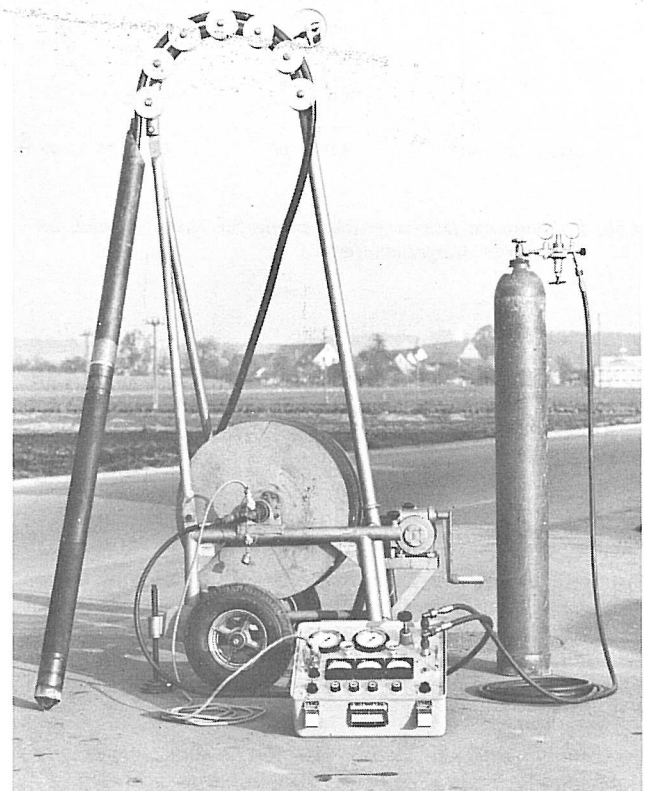


Abb. 1 Dilatometer 95

Der Druck wird mit einer stahlarmierten Gummimanschette auf die Bohrlochwandung übertragen. Mit Hilfe von Stickstoff können Drücke bis 120 kg/cm² aufgebracht werden.

Der Versuch wird ähnlich wie Lastplattenversuche durchgeführt. Für jede Laststufe werden die Deformationen bis zum Abklingen verfolgt. Mit den ermittelten Werten werden die Last-Deformations-Kurven mit Belastung und Entlastung aufgezeichnet. Die Moduln der Belastung im folgenden mit E und die Moduln der Entlastung mit E_a bezeichnet, werden mit der Formel für dickwandige Rohre nach Lamé berechnet:

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta d} (1 + \nu) d \quad \text{Annahme } \nu = 0,33$$

*) Diese Mitteilung wurde nach der Tagung eingereicht.

Da sich bei jedem Versuch mit Hilfe der 3 Extensometer drei Spannungs-Dehnungs-Diagramme ergeben (Abb. 2), kann mit relativ wenig Versuchen eine Streuungsanalyse durchgeführt werden.

Mit dem Gerät können E-Moduln im Boden und fels im Bereich zwischen 50 kg/cm² bis 150'000 kg/cm² ermittelt werden.

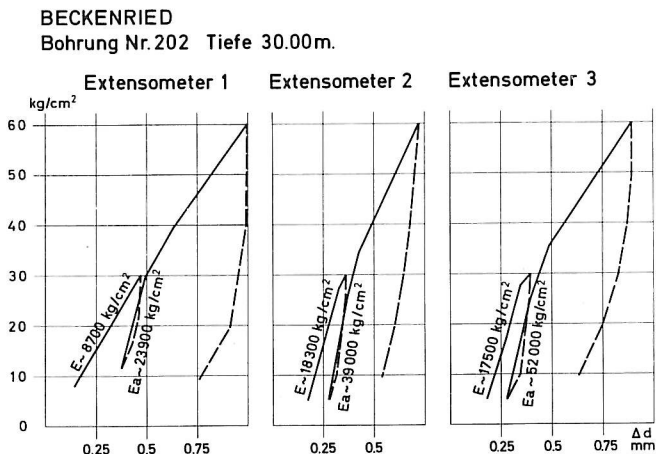


Abb. 2 Spannungs-Dehnungs-Diagramme für einen Versuch im klüftigen Mergelschiefer

3. VERSUCHSRESULTATE DER IN-SITU VERSUCHE (DILATOMETER) IM MERGELSCHIEFER UND IM KONGLOMERATISCHEN MERGELSCHIEFER DER FLYSCHSERIE

3.1 Mergelschiefer

Zur Beurteilung der Deformationsmoduln wird im folgenden unterschieden zwischen dem kompakten, nicht klüftigen Mergelschiefer, dem konglomeratischen Mergelschiefer, dem Mergelschiefer mit Klüften und der Auflockerungszone im Uebergangsbereich zum kompakten Mergelschiefer.

Im Anhang sind die Photos der Kerne einer typischen Bohrung (Bohrung 302) im Mergelschiefer enthalten. (Photos entnommen aus dem Bericht über die Dilatometerversuche im Bereich der Brücke 1). Die einzelnen Zonen sind dort ersichtlich. Die Unterteilung für die Interpretation erfolgte auf Grund der geologischen Aufnahmen und des Zustandes der Bohrkerns.

Für die folgende Zusammenfassung der Versuche werden die Mittelwerte E, die Standard-Abweichungen s und die relative Standard-Abweichung V (auch Variationskoeffizient genannt) angegeben.

3.1.1 Kompakter, nicht klüftiger Mergelschiefer der Flyschserie

	Belastung	Entlastung
Mittelwert	$\bar{E} \sim 44'000 \text{ kg/cm}^2$	$\bar{E}_a \sim 80'000 \text{ kg/cm}^2$
Standard-Abweichung	$s \sim \pm 25'000 \text{ kg/cm}^2$	$s \sim \pm 33'000 \text{ kg/cm}^2$
Relative Standard-Abweichung	$V \sim \pm 56 \%$	$V \sim \pm 41 \%$
Verhältniszahl	$E_a/E = 1,8$	Anzahl Werte $n = 17$

In diesen Werten sind sämtliche Versuche in eindeutig nicht geklüftetem Mergelschiefer enthalten, auch die Deformationsmoduln eines Versuches im tektonisierten Mergelschiefer der Bohrung 416. Werden diese Werte nicht berücksichtigt, so ergeben sich die folgenden E-Moduln:

	Belastung	Entlastung
Mittelwert	$\bar{E} \sim 50'000 \text{ kg/cm}^2$	$\bar{E}_a \sim 88'000 \text{ kg/cm}^2$
Standard-Abweichung	$s \sim \pm 22'500 \text{ kg/cm}^2$	$s \sim \pm 32'000 \text{ kg/cm}^2$
Relative Standard-Abweichung	$V \sim \pm 45 \%$	$V \sim \pm 36 \%$
Verhältniszahl	$E_a/E = 1,8$	Anzahl Werte $n = 14$

Für den Versuch im tektonisierten Mergelschiefer ergeben sich Mittelwerte von:

$$\bar{E} \sim 15'000 \text{ kg/cm}^2 \text{ und } \bar{E}_a \sim 38'000 \text{ kg/cm}^2$$

3.1.2 Klüftiger Mergelschiefer der Flyschserie

	Belastung	Entlastung
Mittelwert	$\bar{E} \sim 13'000 \text{ kg/cm}^2$	$\bar{E}_a \sim 34'000 \text{ kg/cm}^2$
Standard-Abweichung	$s \sim \pm 4'600 \text{ kg/cm}^2$	$s \sim \pm 10'000 \text{ kg/cm}^2$
Relative Standard-Abweichung	$V \sim \pm 36 \%$	$V \sim \pm 30 \%$
Verhältniszahl	$E_a/E = 2,6$	Anzahl Werte $n = 11$

3.1.3 Auflockerungszone

	Belastung	Entlastung
Mittelwert	$\bar{E} \sim 1'700 \text{ kg/cm}^2$	$\bar{E}_a \sim 6'900 \text{ kg/cm}^2$
Standard-Abweichung	$s \sim \pm 1'300 \text{ kg/cm}^2$	$s \sim \pm 5'700 \text{ kg/cm}^2$
Relative Standard-Abweichung	$V \sim \pm 77 \%$	$V \sim \pm 82 \%$
Verhältniszahl	$E_a/E = 4,1$	Anzahl Werte $n = 10$

Diese Zusammenstellung zeigt, dass die relative Standard-Abweichung des kompakten Mergelschiefers gegenüber der relativen Standard-Abweichung des klüftigen Mergelschiefers höher liegt. Die höhere Standard-Abweichung, auf die später noch eingegangen wird, ist z.T. durch die Anisotropie hervorgerufen und durch die Schichtung zu erklären. Die kleine Standard-Abweichung im klüftigen Mergelschiefer weist darauf hin, dass die Klüftöffnung in der vorhandenen Flyschserie eine relativ konstante Grösse ist. Der kleine Wert der Verhältniszahl $E_a/E = 2,6$ zeigt, dass die Klüftöffnung im Verband äusserst minimal ist; in den meisten Fällen ist auch eine Klüftfüllung mit Calcit zu beobachten.

Erwartungsgemäss ist die Standard-Abweichung und die Verhältniszahl E_a/E in der Auflockerungszone hoch. Die Verhältniszahl gibt einen qualitativen Hinweis auf den Grad der Klüftigkeit.

3.2 Konglomeratischer Mergelschiefer der Flyschserie

In zwei Bohrungen (Nr. 435 u. 445) wurden die Dilatometerversuche im konglomeratischen Mergelschiefer durchgeführt. Die errechneten Werte betragen:

	Belastung	Entlastung
Mittelwert	$\bar{E} \sim 23'000 \text{ kg/cm}^2$	$\bar{E}_a \sim 62'000 \text{ kg/cm}^2$
Standard-Abweichung	$s \sim \pm 16'000 \text{ kg/cm}^2$	$s \sim \pm 37'000 \text{ kg/cm}^2$
Relative Standard-Abweichung	$V \sim \pm 69 \%$	$V \sim \pm 59 \%$
Verhältniszahl	$E_a/E = 2,7$	Anzahl Werte $n = 12$

4. VERGLEICH DER DEFORMATIONSMODULN DES DILATOMETERS MIT DEN IM LABOR AN BOHRKERNEN ERMITTELTEN WERTEN

Um die Dilatometerversuche mit Laborversuchen vergleichen zu können, wurden aus entnommenen Bohrkernen im Labor prismatische Proben herausgefräst, deren Abmessungen Breite zu Höhe 1:2 betragen. Um einen statistischen Aufschluss über den Einfluss der Belastungsrichtung auf die Deformationsmoduln zu erhalten, wurden diese Körper parallel zur Bohrloch-Achse und senkrecht dazu (Belastungsrichtung des Dilatometers) herausgeschnitten. Im Mergelschiefer ist die Entnahme solcher Bohrkern und das Zuschneiden sehr schwierig, da die kleinste Austrocknung eine Trennung in der Schichtung zur Folge hat.

Für die Vergleiche stehen insgesamt 7 Versuche an Proben mit einer Belastungsrichtung parallel zur Bohrloch-Achse (Belastungsrichtung vertikal) und 7 Versuche an Proben mit einer Belastungsrichtung senkrecht zur Bohrloch-Achse zur Verfügung. Diese Proben wurden aus 4 Bohrungen entnommen. Für die Gegenüberstellung der Labor- und in-situ Versuchsergebnisse wurden nur die Dilatometer-Versuche im kompakten, nicht klüftigen Mergelschiefer in denselben 4 Bohrungen verwendet.

Belastungsrichtung in Bohrloch-Achse, *Laborversuche*

$$\bar{E} \cong 29'000 \text{ kg/cm}^2 \quad s = \pm 10'000 \text{ kg/cm}^2 \\ V = \pm 33 \% \quad n = 7$$

Belastungsrichtung senkrecht zu Bohrloch-Achse, *Laborversuche*

$$\bar{E} \cong 41'000 \text{ kg/cm}^2 \quad s = \pm 21'000 \text{ kg/cm}^2 \\ V = \pm 52 \% \quad n = 7$$

Belastungsrichtung senkrecht zu Bohrloch-Achse, *Dilatometerversuche*

$$\bar{E} \cong 42'000 \text{ kg/cm}^2 \quad s = \pm 22'000 \text{ kg/cm}^2 \\ V = \pm 52 \% \quad n = 11$$

Die Korrelation zwischen den Laborversuchen mit der Belastungsrichtung senkrecht zur Bohrloch-Achse und den Dilatometerversuchen in-situ ist äusserst gut. Sie kann nur mit der kompakten, klüftfreien Lagerung erklärt werden; eine Korrelation dieser Genauigkeit zwischen Labor- und Feldversuchen ist nicht häufig zu beobachten. Der Unterschied der E-Moduln je nach Belastungsrichtung bestätigt die häufige Beobachtung, dass der Deformationsmodul bei einer Belastungsrichtung senkrecht zur Schichtung kleiner ist als bei der Belastungsrichtung parallel zur Schichtung. Bei den untersuchten Proben beträgt der mittlere Winkel der Schichtung gegenüber der Horizontalen zwischen 5° und 10° (minimal 0° maximal ca. 20°).

5. DEFORMATIONSMODULN DES VERLEHMTE GEHAENGESCHÜTTES. VERGLEICH ZWISCHEN LASTPLATTEN- UND DILATOMETERVERSUCHEN.

Die Durchführung von in-situ Versuchen in besonders stark verlehmtten Böden ist problematisch, da die Porenwasserspannungen nicht berücksichtigt werden. Jedoch waren wegen dem hohen Schotteranteil keine anderen Versuche, insbesondere im Labor, möglich.

Je drei Lastplattenversuche wurden während dem Abteufen eines Schachtes in drei Horizonten durch den Kanton Nidwalden durchgeführt. Es stehen für die Vergleiche 9 Versuche zur Verfügung.

Fünf Dilatometerversuche wurden in 2 Bohrungen ausgeführt. Ein Versuch wird für die folgende Gegenüberstellung nicht verwendet, da auf Grund der Belastungs-Deformations-Kurve eine sehr starke Störung, hervorgerufen durch die Bohrung, zu beobachten war.

Lastplattenversuche

Tiefe (m)	Laststufen kg/cm ²	Versuch A kg/cm ²	Versuch B kg/cm ²	Versuch C kg/cm ²	Mittelwert kg/cm ²
12,50	1,5 - 2,5	146	180	263	196
13,70	1,5 - 2,5	48	31	19	33
15,90	1,5 - 2,5	241	179	137	186

Dilatometerversuche

Bohrloch	Tiefe (m)	Laststufe kg/cm ²	Ext. 1 kg/cm ²	Ext. 2 kg/cm ²	Ext. 3 kg/cm ²	Mittelwert kg/cm ²
201a	10,95	2,5	240	200	170	203
201a	13,30	3	62	65	44	57
201a	16,60	3	30	44	55	43
203	15,45	6	160	140	150	150

Die höheren M_E -Werte wurden in Kies-Schichten mit wenig bindigem Anteil und die kleinen Werte in bindigen durchnässten Zonen ermittelt. Der Vergleich der Lastplattenversuche und der Dilatometerversuche zeigt eine verhältnismässig gute Korrelation der beiden Versuchsarten. Unter den örtlichen Spannungszuständen sind die Deformationsmoduln höher als die beobachteten. Beim Dilatometerversuch tritt durch die Entlastung und die Bohrung eine Störung ein. Dies hat zur Folge, dass die M_E -Werte erst unter grösseren Spannungszuständen ermittelt werden können.

6. ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNG

Mit Hilfe der in-situ Versuche im Bohrloch mit dem Dilatometer können die Mergelschiefer der Flyschserie im Verband getestet werden. Die Laborversuche bestätigen die ermittelten Deformationsmoduln des kompakten, nicht klüftigen Felses, sie erlauben auch eine Aussage über die Anisotropie des nicht klüftigen Mergelschiefers. Die Laborversuche allein sind jedoch nicht hinreichend, da damit der Einfluss der Klüftigkeit auf die Deformationsmoduln und die Auflockerungszone nicht untersucht werden kann. Auch können in den tektonisierten Zonen keine Proben entnommen werden und in den Konglomeraten ist der Durchmesser der Komponenten im Verhältnis zur Probe zu gross.

Der mittlere Belastungsmodul des kompakten Mergelschiefers beträgt im untersuchten Bereich $E \sim 50'000 \text{ kg/cm}^2$ und der Entlastungsmodul $\bar{E}_a \sim 88'000 \text{ kg/cm}^2$.

Klüfte haben eine Abnahme der Werte auf ca. $13'000 \text{ kg/cm}^2$ zur Folge ($\bar{E}_a \sim 34'000 \text{ kg/cm}^2$). Werte ähnlicher Grössenordnung wurden auch in tektonisierten Zonen ermittelt.

Der konglomeratische Mergelschiefer zeigte einen Deformationsmodul von $\bar{E} \sim 23'000 \text{ kg/cm}^2$ ($\bar{E}_a \sim 61'000 \text{ kg/cm}^2$).

Die beobachteten relativen Standard-Abweichungen sind im Verhältnis zu anderen geologischen Formationen gering, Ausnahmen bilden die Auflockerungszone und die konglomeratischen Mergelschiefer.

Die Anisotropie des kompakten, klüftigen Mergelschiefers konnte mit den Laborversuchen nachgewiesen werden. Bei der Belastungsrichtung im Winkel von 85° bis 80° im Mittel zur Schichtung ist der Deformationsmodul um ca. 30 % geringer als bei der Belastungsrichtung 5° bis 10° zur Schichtrichtung. Aehnliche Werte für den Unterschied (28 %) haben A. von Moos und F. de Quervain ¹⁾ für feinkörnige Molassesandsteine und sandige Mergelschiefer angegeben. Die verschiedenen Standard-Abweichungen je nach Belastungsrichtung sind eine Folge der Schichtung, während bei der senkrechten Belastungsrichtung ein ganzes "Schichtpaket" belastet wird, werden bei der parallelen Belastung eher einzelne Schichten mit unterschiedlichem Kornaufbau erfasst.

Der Vergleich der M_E -Moduln ermittelt mit der Lastplatte im Schacht und dem Dilatometer im Bohrloch im verlehmten Schotter der Ueberlagerung zeigt, dass die Werte dieselbe Grössenordnung aufweisen. Natürlich gibt es auch im Lockergestein die Anisotropie nachzuweisen, bei dem anstehenden und mehrheitlich umgelagerten Hangschotter ist jedoch eine Anisotropie nicht zu erwarten.

Der Verfasser möchte Herrn Boffo, Kantonsingenieur Nidwalden für die Erlaubnis, die umfangreichen Untersuchungen zu veröffentlichen, danken.

1) A. von Moos und F. de Quervain
Technische Gesteinskunde
Verlag Birkhäuser, Basel

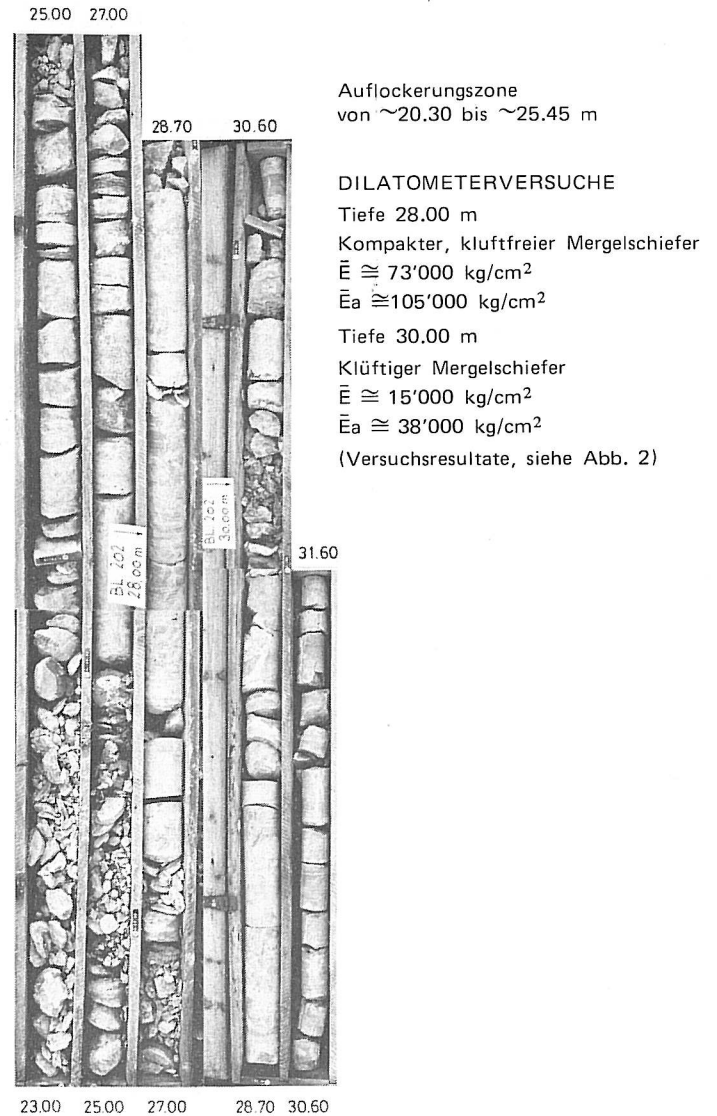


Abb. 3 Beispiel: Photos der Kerne des Mergelschiefers der Flyschserie im Bereich der Dilatometerversuche, Bohrung Nr. 202

Adresse des Verfassers:

Dr. A. Thut
c/o SOLEXPERS A.G.
Dufourstrasse 147
8008 Zürich