

Untersuchungen über die Zusammendrückbarkeit vorbelasteter toniger Böden des Wiener Beckens

von Manfred Fross

1. Einleitung

1.1. Geologische Einführung

Der Boden des Wiener Beckens besteht aus mächtigen Ablagerungen tertiärer Sedimente. Die quartären Überdeckungen im Wiener Stadtgebiet sind örtlich verschieden mächtig, jedoch kaum mächtiger als 20 Meter.

Die feinkörnigen Tertiärsedimente, meistens feinsandige oder tonige Schluffe, werden üblicherweise als Wiener Tegel bezeichnet. Ihre Ablagerung erfolgte in Zeiten von Transgressionen, in denen der Spiegel des Meeres oder des späteren Binnensees beträchtlich über der heutigen Geländeoberfläche lag.

Die Verlandung dieser Meere und Seen führte im Zusammenhang mit der späteren Abtragung der Sedimente bis zu den heutigen Oberflächen der tertiären Schichten dazu, daß die Beckenfüllung heute aus geologisch vorbelasteten Bodenschichten besteht. Zugleich mit der Sedimentation und im Anschluß daran waren tektonische Vorgänge wirksam, in deren Verlauf es durch Absenkung des Flysch- bzw. kalkalpinen Beckenuntergrundes zur Bildung von Brüchen und durch dabei aufgetretene Tangentialkräfte örtlich auch zur Verspannung und Verformung der tertiären Schichten kam. Diese Vorgänge reichten mindestens bis ins Jungtertiär [1], [2].

Die Wiener Tegel können daher als geologisch vorbelastete und tektonisch beanspruchte feinkörnige Bodenschichten bezeichnet werden.

Bei allen größeren Bauvorhaben im Raum von Wien spielen diese tertiären Sedimente bei Fundierungen oder anderen tiefbaulichen Arbeiten eine entscheidende Rolle.

1.2. Die Bestimmung der Zusammendrückbarkeit der tertiären Sedimente des Wiener Beckens und ihre Methoden

1.2.1. Bisherige Untersuchungsmethoden

Die Bedeutung der tertiären Beckenfüllung als Baugrund hat dazu geführt, daß mit diesen Böden schon seit mehreren Jahrzehnten bodenmechanische Laboratoriumsuntersuchungen sowohl für bautechnische Zwecke als auch aus Gründen wissenschaftlicher Forschungen durchgeführt werden.

Versuche zur Bestimmung der Zusammendrückbarkeit dieser Böden an ungestörten Proben — zum Beispiel zur Ermittlung von Verformungsmoduln für Setzungsberechnungen — waren im Rahmen der bisherigen Untersuchungen stets Teil des Versuchsprogramms, doch wurde dem Umstand, daß es sich um stark überverdichtete Böden handelt, bei diesen Versuchen nicht genügend Rechnung getragen.

Da sowohl bei der Entnahme aus Probeschürfen und Bohrlöchern als auch beim Zuarbeiten und beim Einbau in die Versuchsapparate eine gewisse Beeinträchtigung des ungestörten Zustandes der Proben unvermeidlich ist, die Ergebnisse von Zusammendrückungsversuchen mit verhinderter Seitendehnung, sogenannte Ödometerversuche [3], also stark fehlerbehaftet sein können [4], [5], [6], wurden bereits vielfach Versuchsmethoden vorgeschlagen, die zumindest diese Entnahme- und Einbaufehler ausschalten oder verringern.

1.2.2. Vorschläge für verbesserte Versuchsmethoden

Alle Vorschläge für verbesserte Versuchsmethoden beruhen auf der Überlegung, daß der überverdichtete Boden durch eine 1. Wiederbelastung im Laboratorium in einen dem ungestörten Zustand ähnlicheren zurückgeführt wird. Diese 1. Wiederbelastung soll Entnahme- und Einbaufehler beseitigen. Eine 2. Wiederbelastung nach vorhergehender Entlastung auf einen bestimmten Wert liefert dann weniger fehlerbehaftete Ergebnisse. Eine genaue Vorgangsweise für solche Versuche gibt unter anderen BRINCH-HANSEN [7] an. Er schlägt vor, die geologische Vorgeschichte des Bodens im Laboratorium nachzuahmen, indem die 1. Wiederbelastung bis zu jener Belastung geführt wird, von der anzunehmen ist, daß sie die höchste ist, der der Boden jemals ausgesetzt war, nämlich bis zur geologischen Vorbelastung. Dann wird eine Entlastung bis auf die geringste Spannung, die jemals wirksam war, eingeschaltet und sodann bis über die geologische Vorbelastung hinaus noch einmal wiederbelastet. Diese Wiederbelastung wird für die Ermittlung der Zusammendrückungsmoduln herangezogen. Eine derartige Versuchsdurchführung setzt also die Kenntnis der geologischen Vorbelastung voraus.

1.2.3. Die Bestimmung der geologischen Vorbelastung

Eine Methode zur Ermittlung der geologischen Vorbelastung aus Ödometerversuchen mit ungestörten Bodenproben wurde erstmals von A. CASAGRANDE [8] entwickelt. In der Literatur findet man heute eine Reihe von Verfahren, auf deren genaue Schilderung hier nicht eingegangen werden soll, da eine solche bereits von SCHULTZE - MUHS [9] und KOTZIAS [10] in übersichtlichen Zusammenstellungen gegeben wurde.

1.2.4. Anlaß zur Anwendung verbesserter Versuchsmethoden

Anläßlich der bodenmechanischen Laboratoriumsuntersuchungen für den Ausbau des öffentlichen unterirdischen Verkehrsnetzes von Wien wurden erstmals in größerem Umfang Versuche in der in Abschnitt 1.2.2. beschriebenen Weise an ungestörten Proben des Wiener

Tegels durchgeführt. Mit der Ausführung dieser Versuche war das Laboratorium des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule Wien betraut.

1.2.5. Festlegung des genauen Versuchsprogrammes

Bei der Bemessung von elastischen Auskleidungen im unterirdischen Tunnelbau muß auf die Wechselbeziehungen zwischen der Steifigkeit der Tunnelauskleidung und der Verformbarkeit der Bettung, also des angrenzenden Bodens, Bedacht genommen werden [11], [12]. Bei geschlossenen Ausbauquerschnitten sollte die Zusammendrückbarkeit des Bodens nach allen Richtungen bekannt sein. Es wurde daher jede Probe in den beiden wichtigsten Richtungen, also in lotrechter und in waagrechter Richtung, auf ihre Zusammendrückbarkeit untersucht. Es kamen bei jeder Probe folgende 4 Versuchstypen zur Ausführung:

„V 1“ Versuch mit lotrechter Belastungsrichtung zur Ermittlung der geologischen Vorbelastung.

„H 1“ Versuch mit waagrechter Belastungsrichtung zur Ermittlung der höchsten waagrechten Spannung, der die Probe jemals ausgesetzt war.

„V 2“ Versuch mit lotrechter Belastungsrichtung mit folgender Vorgangsweise:

Belastung bis zu der in Versuch „V 1“ ermittelten geologischen Vorbelastung, Entlastung auf den geringsten Überlagerungsdruck, der zur Zeit der größten Abtragung wirksam war und Wiederbelastung über die geologische Vorbelastung hinaus mit anschließender Entlastung auf Null.

„H 2“ Versuch mit waagrechter Belastungsrichtung in sinngemäßer Vorgangsweise wie bei Versuch „V 2“.

Zur Ermittlung der Zusammendrückungsmoduln wurde der Wiederbelastungsast der Versuche „V 2“ und „H 2“ herangezogen.

Da für die Untersuchung jeder Probe in zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen in der vorgeschlagenen Weise noch keine Erfahrungen vorlagen, wurde versucht, durch eigene Laboratoriumsversuche mit künstlich vorverdichteten Proben sowohl qualitative als auch quantitative Vorstellungen von den Unterschieden zu gewinnen, die bei Wiederbelastungsversuchen dieser Art auftreten können. Vor allem hinsichtlich der Möglichkeit, den aufgebrauchten Vorverdichtungsdruck sowohl in lotrechter als auch in waagrechter Richtung zu rekonstruieren, sollten diese eigenen Versuche Aufschluß geben. Weiters sollten im Laboratorium vorverdichtete Proben größeren Scherbeanspruchungen unterworfen und im anschließenden Wiederbelastungsversuch im Kompressionsapparat auf Veränderungen der Zusammendrückbarkeit zufolge der in den Proben erzeugten Kornumlagerungen untersucht werden.

Gegenstand des 2. Abschnittes dieser Arbeit sind die aus diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse. Im 3. Ab-

schnitt wird diesen Ergebnissen die Auswertung einer Versuchsreihe mit Proben ungestörten Wiener Tegels gegenübergestellt. Die aus dieser Gegenüberstellung gewonnenen Erkenntnisse und Schlußfolgerungen werden im 4. Abschnitt zusammengefaßt. Eine genaue Darstellung der Versuchsergebnisse sowie deren Auswertung und Deutung wurde vom Verfasser bereits gegeben [13].

2. Eigene Untersuchungen

2.1. Versuchsboden, Versuchsgeräte, Versuchsvorgang

Es war naheliegend, für die eigenen Untersuchungen ein Material zu verwenden, das einerseits seinen Eigenschaften nach in die Versuchsreihe mit Proben ungestörten Wiener Tegels paßt, andererseits jenen Materialien ähnlich ist, die bereits öfter für Versuchsreihen im Laboratorium des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule Wien verwendet wurde [14], [15].

Das geeignete Material, ein toniger Schluff mit etwa 4 Gewichtsprozent Sand (Korngröße $> 0,06$ mm) und 23 Gewichtsprozent Kolloidton (Korngröße $> 0,002$ mm) wies bei einer Atterbergschen Fließgrenze von 47% und einer Ausrollgrenze von 23,5% eine Plastizitätszahl von 23,5% auf.

Das bei Wassergehalten oberhalb der Fließgrenze maschinell homogenisierte Material wurde in Rahmenscherbüchsen von 100 cm² quadratischem Querschnitt und Rahmenhöhen von 7 bzw. 14 cm stufenweise auf den gewünschten Vorverdichtungsdruck belastet. Nach 6tägiger Konsolidation unter diesem Druck wurden die so erzeugten Proben rasch und ohne Wasserzugabe entlastet und nach entsprechender Zuarbeitung in Ödometer der von TERZAGHI vorgeschlagenen Bauart [16] mit ca. 26 cm² lichtem Querschnitt und 2 cm Probenhöhe eingebaut und einer stufenweisen Wiederbelastung unterzogen.

Bei allen Wiederbelastungsversuchen wurden stets die gleichen Laststufen angewendet. Die Belastungsdauer pro Laststufe betrug 24 Stunden. Die Höchstlast wurde mit 50 kp/cm² festgelegt. Der Belastungsvorgang bestand aus 10, der Entlastungsvorgang mit Wasserzugabe aus 6 Laststufen. Wegen der elastischen Eigenverformbarkeit der Kompressionsapparate unter hohen Lasten wurden bei der Messung der Proben-Zusammendrückungen Korrekturwerte in Rechnung gestellt, die aus wiederholten Be- und Entlastungsversuchen mit leeren Apparaten bestimmt wurden. Die Größenordnung dieser Korrekturwerte bei der Höchstlast von 50 kp/cm² lag bei 0,2 bis 0,3 mm.

2.2. Ergebnisse der Versuche mit Wiederbelastung in verschiedenen Richtungen

Es wurden insgesamt 19 Wiederbelastungsversuche mit Proben durchgeführt, die unter Drücken von $p_v = 5,0$, 10,0 und 15,0 kp/cm² vorverdichtet worden waren.

Bei 9 Proben wurde in Richtung des Vorverdichtungsdruckes wiederbelastet, bei 2 Proben schloß die Wieder-

belastungsrichtung mit der Richtung des Vorverdichtungsdruckes einen Winkel von $\alpha = 45^\circ$ ein. Bei 8 Versuchen bildeten Vorverdichtungs- und Wiederbelastungsrichtung einen rechten Winkel. Die aus den Ergebnissen dieser Wiederbelastungsversuche errechneten Druck-Porenziffer-Diagramme wurden graphisch dargestellt, wobei die Drücke in logarithmischem Maßstab als Abszisse und die Porenziffer als Ordinate aufgetragen wurden. Die Ergebnisse mehrfach ausgeführter Versuche wurden vor ihrer weiteren Auswertung gemittelt, um Streuungen der Ergebnisse zu verringern. Als typische Versuchsergebnisse sind die gemittelten Druck-Porenziffer-Diagramme von je 2 Versuchen mit einem Vorverdichtungsdruck von $p_v = 10,0 \text{ kp/cm}^2$ (2 Versuche mit $\alpha = 0^\circ$, 2 Versuche mit $\alpha = 90^\circ$) in Abb. 1 dargestellt.

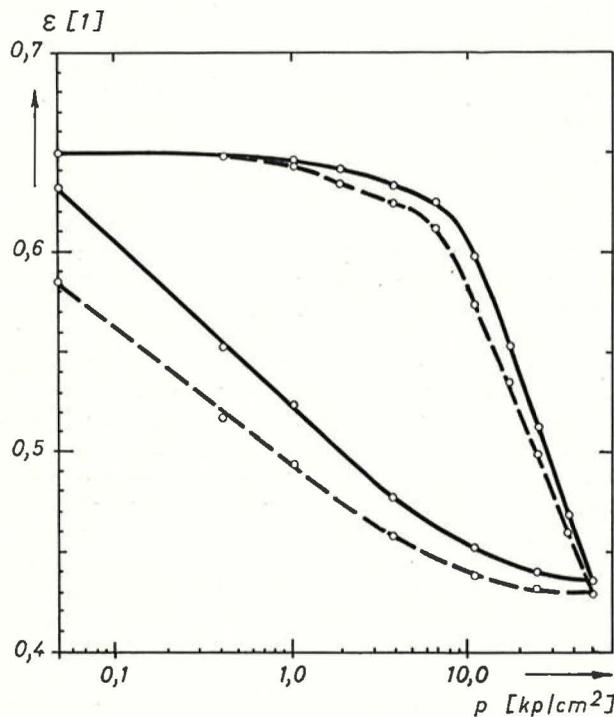


Abb. 1 Charakteristisches Versuchspaar ($p_v = 10,0 \text{ kp/cm}^2$, $\alpha = 0^\circ$ bzw. 90°).

Das Druck-Porenziffer-Diagramm eines Wiederbelastungsversuches mit einer vorverdichteten Tonprobe läßt sich nach TERZAGHI [3] durch die Beziehung

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \frac{1}{C_V} \cdot \ln(p + p_c)$$

darstellen, wobei

- ε ... die Porenziffer
- p ... der Druck und
- ε_1, C_V, p_c ... Konstante sind.

Für hohe Lasten, die den Vorverdichtungsdruck beträchtlich übersteigen, wird $p_c = 0$, d. h., daß die Krümmung der Kurve bei der verwendeten halb-

logarithmischen Darstellung Null wird. Die Gleichung vereinfacht sich daher zu

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \frac{1}{C_V} \cdot \ln p,$$

wobei

- ε_1 ... die Porenziffer bei $p = 1,0 \text{ kp/cm}^2$
- C_V ... der Kompressionsbeiwert für Erstverdichtung bzw.
- $1/C_V$... der Anstieg der Geraden ist.

Bei der weiteren Auswertung der Versuche wurden neben der Porenziffer ε_0 bei Beginn des Wiederbelastungsversuches, den beiden Konstanten ε_1 und C_V der Vorverdichtungsdruck nach dem Verfahren von A. CASAGRANDE [8] ermittelt.

Einen Überblick über die Ergebnisse dieser Versuche gibt Tabelle 1, in der die charakteristischen Größen jeweils als Mittelwerte aus mehreren gleichwertigen Einzelversuchen eingetragen sind.

Tabelle 1

Anzahl der Einzelversuche	lotrechter Vorverdichtungsdruck p_v	Winkel zwischen Vorverdichtung u. Wiederbelastung α	Porenziffer vor Wiederbelastung ε_{0m}	Erstbelastungsgerade			
				Konstanten der Gleichung ε_1, C_{vm}	Gültigkeitsbereich	Vorverdichtungsdruck rekonstruiert nach CASAGRANDE p_v	
—	p_v	α	ε_{0m}	ε_{1m}	C_{vm}	—	p_v
—	[kp/cm^2]	[$^\circ$]	—	—	—	[kp/cm^2]	[kp/cm^2]
5	5,0	0	0,745	0,897	8,49	6–55	5,0
2	5,0	45	0,734	0,854	9,12	5,5–45	4,5
4	5,0	90	0,742	0,859	9,34	6–50	4,3
2	10,0	0	0,650	0,877	8,81	12–40	10,0
2	10,0	90	0,650	0,825	9,89	20–50	8,5
2	15,0	0	0,631	0,881	8,63	16–45	14,2
2	15,0	90	0,624	0,825	10,02	18–50	12,0

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Ergebnissen dieser Versuche waren, daß sich bei Wiederbelastungsversuchen mit unveränderter Belastungsrichtung die Höhe des Vorverdichtungsdruckes sehr genau rekonstruieren ließ. Bei einer Wiederbelastungsrichtung senkrecht zum Vorverdichtungsdruck wurde unabhängig von der Höhe des Vorverdichtungsdruckes ein Wert $\overline{p_v(H)}$ von 85% des aufgebrachtten Vorverdichtungsdruckes p_v ermittelt:

$$\overline{p_v(H)} = 0,85 \cdot p_v \text{ bzw. } \frac{\overline{p_v(H)}}{p_v} = \beta = 0,85$$

Dieser Wert, der in weiterer Folge β genannt werden soll, liegt über dem Wert des Seitendruckbeiwertes λ_0 , der für den Spannungszustand während der Vorver-

dichtung der Probe angenommen werden kann. Dieser Seitendruckbeiwert λ_0 müßte auf Grund bisheriger Erfahrungen bei Messungen des Ruhedruckbeiwertes erstverdichteter toniger Böden mit etwa

$$\lambda_0 = 0,45 \div 0,70$$

erwartet werden [17], [18].

Da durch die allseitige Entlastung der vorverdichteten Probe vor ihrer Bearbeitung und dem Wiedereinbau in das Ödometer ein Porenwasserunterdruck entstehen kann, dessen Wert etwa dem Mittelwert der bei der Vorverdichtung wirksam gewesenen Hauptspannungen gleichzusetzen wäre, besteht die Möglichkeit, daß die Probe vor ihrer Wiederbelastung in horizontaler Richtung bereits unter einer Spannung gestanden war, die größer als der Ruhedruck ist. Ist diese Spannung $0,85 \cdot p_V$, so würde dies einem Ruhedruckbeiwert

$$\lambda_0 = 0,775$$

entsprechen.

Damit ergibt sich ein verhältnismäßig enger Bereich

$$0,775 < \lambda_0 < 0,85$$

für den möglichen Seitendruck bei der Vorverdichtung, der jedoch über den bisher beobachteten Werten des Ruhedruckbeiwertes liegt.

Konsolidiert man eine aufbereitete Probe unter einem bekannten Ruhedruckverhältnis in einer Triaxialzelle, so müßte sich dieses Verhältnis aus den Ergebnissen von 2 Wiederbelastungsversuchen in Ödometern in den beiden Hauptspannungsrichtungen des Konsolidierungszustandes unter Anwendung der vorher dargelegten Überlegungen rekonstruieren lassen. Der frei zu wählende Seitendruck ist hierbei zweckmäßig möglichst von den bei der Konsolidation in Rahmenscherbüchsen auftretenden Seitendrücken abweichend anzunehmen. Für einen Versuch dieser Art wurde daher als Ruhedruck der Wert $0,5 \cdot p_V$ gewählt. Bei der Rekonstruktion des aufgebrachten Vorverdichtungsdruckes aus den Druck-Porenziffer-Diagrammen der Wiederbelastungsversuche zeigte sich, daß die bei der Konsolidation wirksam gewesene horizontale Spannung von $0,5 \cdot p_V$ sich aus dem entsprechenden Kompressionsversuch nicht in der erwarteten Weise ergab. Es wurde ein Wert

$$\overline{p_V(H)} \doteq 0,76 \cdot p_V \text{ bzw. } \beta \doteq 0,76$$

ermittelt.

Da dieser Wert wesentlich größer als der Mittelwert der drei Hauptspannungen des Vorverdichtungszustandes ist, welcher im vorliegenden Fall zwei Drittel beträgt, läßt sich der Schluß ableiten, daß die Ermittlung des dem Vorverdichtungsdruck zugeordneten Seitendruckes in der angewendeten Weise (also nach dem Verfahren von CASAGRANDE) nicht direkt möglich ist. Der Wert $\overline{p_V(H)}$ ist vielmehr eine bestimmte Kenngröße, die ungefähr mit dem 1,5-fachen Wert des Seitendruckes der Vorverdichtung gleichzusetzen ist.

Der Wert $\beta \doteq 0,85$, welcher bei jenen Proben ermittelt

wurde, die in Rahmenscherbüchsen vorverdichtet worden waren, entspricht dann einem Seitendruck bei der Vorverdichtung von

$$\lambda_0 = \frac{\beta}{1,5} = 0,56.$$

Dieser Wert liegt innerhalb der bisher beobachteten Grenzen des Ruhedruckes erstverdichteter toniger Böden.

Bei weiterer Analyse der Versuchsergebnisse zeigt sich, daß bei Überschreitung des Vorverdichtungsdruckes im Wiederbelastungsversuch eine von der Wiederbelastungsrichtung abhängige unterschiedliche Zusammendrückbarkeit feststellbar ist, wie aus den ermittelten Größen des Kompressionsbeiwertes C_V für diesen Bereich hervorgeht.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit einer tabellarischen Übersicht über die prozentuellen Unterschiede in der Zusammendrückbarkeit je nach Art des Wiederbelastungsversuches gibt Abb. 2. Es ist daraus

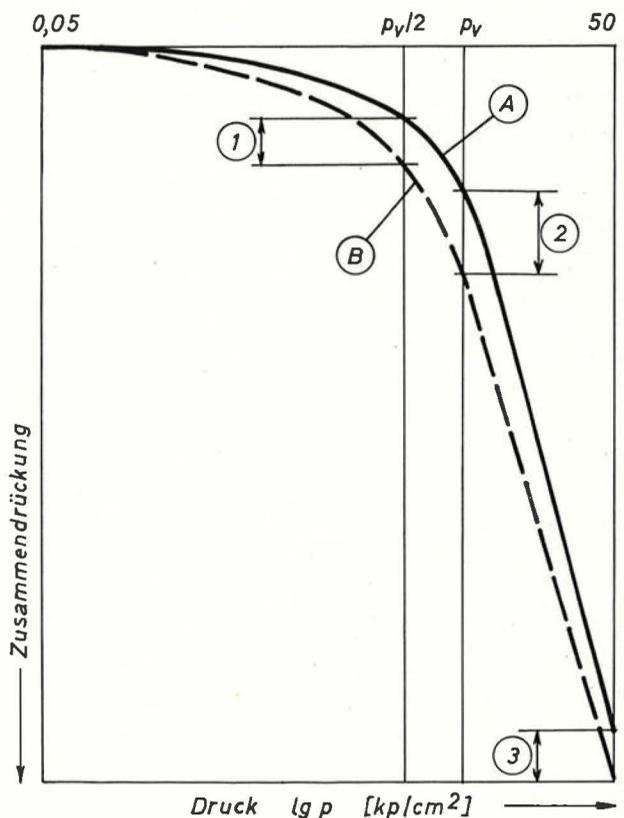


Abb. 2 Zusammenfassung der Ergebnisse von Abschnitt 2.2.

Kurve A ... schematische Darstellung des Druck-Zusammendrückungsdiagramms der Versuche mit Wiederbelastung in Richtung der Vorverdichtung ($\alpha = 0^\circ$).

Kurve B ... schematische Darstellung des Druck-Zusammendrückungsdiagramms der Versuche mit Wiederbelastung in von der Vorverdichtungsrichtung abweichenden Richtungen ($\alpha = 45^\circ, 90^\circ$).

p_v	α	① bei $p_v/2$	② bei p_v	③ bei $p_{max.}$
kp/cm ²	°	%	%	%
5,0	45	+15	+14	0
	90	+19	+20	-1
10,0	90	+52	+66	+3
15,0	90	+36	+38	+1
Mittelw.	90	+35	+41	+1

zu ersehen, daß der Wiederbelastungsversuch in Richtung des aufgebrachtten Vorverdichtungsdruckes die geringsten Zusammendrückungen in allen Spannungsbereichen liefert.

2. 3. Ergebnisse der Wiederbelastungsversuche mit scherbeanspruchten vorverdichteten Proben

Von den insgesamt 18 Wiederbelastungsversuchen, die den Einfluß von Scherbeanspruchungen klären sollten, entfielen 11 auf Proben, die nach der Vorverdichtung und vor ihrer Wiederbelastung Scherbeanspruchungen unter gleichzeitiger Konstanthaltung des Probenvolumens [19] unterworfen wurden. Die restlichen 7 Proben dienten für Vergleichsversuche ohne Scherbeanspruchungen.

Diese Versuche verfolgten den Zweck, zu zeigen, daß vorverdichtete Proben, in denen durch Scherbeanspruchungen Kornumlagerungen stattfinden, ohne daß sich dabei der Verdichtungszustand der Proben ändert, bei Wiederbelastungsversuchen deutliche Veränderungen des Zusammendrückungsverhaltens erkennen lassen, oder mit anderen Worten, daß zwei Proben des gleichen Materials und des gleichen Verdichtungszustandes bei Wiederbelastungsversuchen durchaus unterschiedliche Ergebnisse liefern können.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten der Versuche und ihrer Ergebnisse ist in Tabelle 2 zu finden.

Es wurden Vorverdichtungsdrücke von 3,0 bis 7,0 kp/cm² und horizontale Scherverformungen von 3,5 bis 10,0 mm angewendet. Die größten Scherspannungen betragen 0,80 bis 1,80 kp/cm².

Abb. 3 zeigt als Beispiel für die Ergebnisse dieser Versuche die Druck-Porenziffer-Diagramme eines Versuchspaares mit einem Vorverdichtungsdruck von $p_v = 7,0$ kp/cm². Rekonstruiert man aus diesen Diagrammen die aufgebrachtten Vorverdichtungsdrücke, so ergeben sich bei den scherbeanspruchten Proben gegenüber den Vergleichsversuchen bzw. den tatsächlich aufgebrachtten Vorverdichtungsdrücken um 6 bis 27% höhere Werte.

Aus den Änderungen der Spannungsverhältnisse im Verlauf der Scherbeanspruchung läßt sich diese Erscheinung nicht erklären. Es scheint also, daß die Theorie von A. CASAGRANDE zur Rekonstruktion des Vorverdichtungsdruckes für diese Fälle nicht vollkommen zutreffend ist, sondern zu hohe Werte liefert.

Veränderungen im Verformungsverhalten der scherbeanspruchten Proben zeigen sich aber nicht nur in

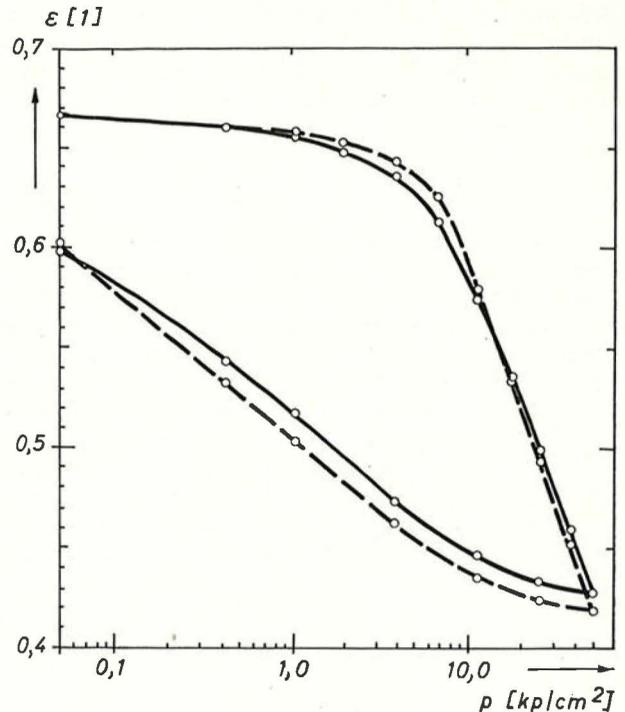


Abb. 3 Charakteristisches Versuchsergebnis ($p_v = 7,0$ kp/cm², Scherverformung $\Delta x = 7,0$ mm, Vergleichsversuch strichliert eingetragen).

Lastbereichen unterhalb des Vorverdichtungsdruckes, sondern auch im besonderen Maße im Bereich hoher Drücke. Einerseits sind wesentlich höhere Drücke als

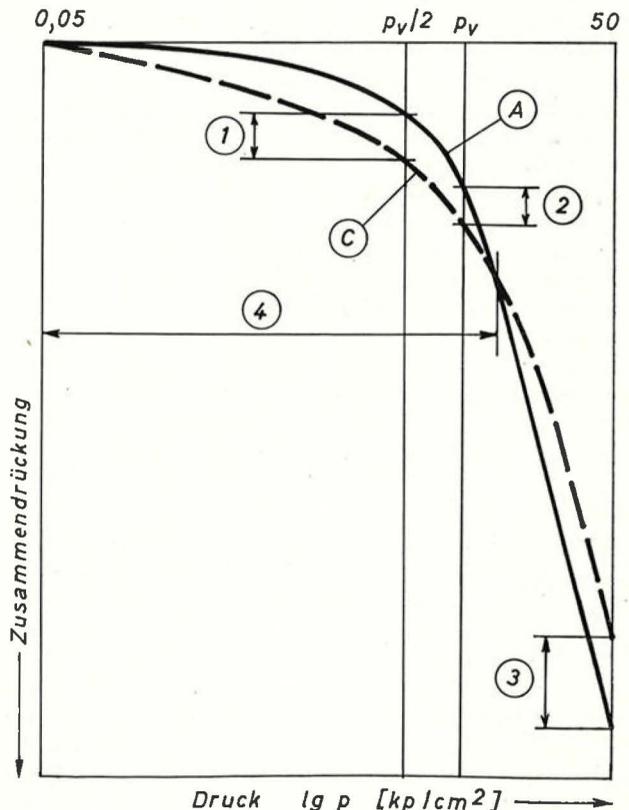


Abb. 4 Zusammenfassung der Ergebnisse von Abschnitt 2.3.

Kurve A ... schematische Darstellung des Druck-Zusammendrückungsdiagramms von Versuchen mit Wiederbelastung in Richtung der Vorverdichtung (Vergleichsversuche).

Kurve C ... schematische Darstellung des Druck-Zusammendrückungsdiagramms von Wiederbelastungsversuchen scherbeanspruchter Proben (Wiederbelastung in Richtung der Vorverdichtung).

	① bei $p_v/2$	② bei p_v	③ bei p_{max}	④
	%	%	%	—
min.	— 5	— 5	— 3	$0,8p_v$
max.	+87	+70	—15	$3,0p_v$
Mittel	+31	+23	— 8	$1,8p_v$

bei den Vergleichsversuchen notwendig, um den geradlinigen Teil des halblogarithmisch dargestellten

Druck-Porenziffer-Diagrammes zu erreichen, andererseits unterscheiden sich die Konstanten der Gleichung dieser Geraden, vor allem der Kompressionsbeiwert C_v , deutlich von jenen der Vergleichsversuche. Es zeigt sich nicht nur eine Erhöhung dieses Wertes überhaupt, sondern auch eine Zunahme, abhängig von der Größe der erzeugten Scherverformung.

Abb. 4 gibt wieder in ähnlicher Weise wie Abbildung 2 einen Überblick über die Ergebnisse dieser Versuchsreihe, wobei die prozentuellen Unterschiede der einander gegenübergestellten Versuche in einer tabellarischen Übersicht zusammengefaßt sind. Demnach liefern die scherbeanspruchten Proben bei Spannungen, die kleiner als der Vorverdichtungsdruck sind, im Durchschnitt wesentlich größere Zusammendrückungen als die entsprechenden Vergleichsversuche, während ihre Zusammendrückbarkeit bei Drücken, die den Vorverdichtungsdruck wesentlich übersteigen, gegenüber jener der Vergleichsversuche deutlich abnimmt.

Tabelle 2

lotrechter Vorverdichtungsdruck	Scherbeanspruchung			Porenziffer vor Wiederbelastung	Erstbelastungsgerade			Vorverdichtungsdruck rekonstruiert nach CASAGRANDE
	Scherverformung	Scher-spannung	zugeord. Normal-spannung ($\epsilon = const$)		Konstanten der Gleichung	Gültigkeitsbereich		
p_v	$\Delta x, max.$	$\tau_{max.}$	σ_{11}	ϵ_0	ϵ_1	C_v	—	\bar{p}_v
kp/cm ²	mm	kp/cm ²	kp/cm ²	—	—	—	kp/cm ²	kp/cm ²
3,0	5,5	0,800	1,675	0,766	0,867	9,16	6,5—40	3,8
3,0	—	—	—	0,784	0,878	8,98	4,5—45	3,0
4,0	4,0	1,075	2,200	0,732	0,856	9,08	10—50	4,4
4,0	10,0	1,100	2,150	0,702	0,806	9,76	25—50	3,5
4,0	—	—	—	0,758	0,896	8,50	6—40	4,0
5,0	3,5	1,400	2,975	0,724	0,874	8,98	12—50	5,4
5,0	3,5	1,400	2,800	0,714	0,877	9,00	10—45	6,3
5,0	5,0 ¹⁾	1,325	2,650	0,731	0,851	9,42	11—45	5,4
5,0	8,5	1,300	2,675	0,700	0,841	9,48	15—50	5,5
5,0	8,5	1,350	2,750	0,707	0,836	9,59	15—50	5,5
5,0	10,0 ²⁾	1,250	2,550	0,695	0,825	9,99	16—50	5,5
5,0	—	—	—	0,728	0,878	8,76	10—40	5,0
5,0	—	—	—	0,757	0,888	8,70	10—45	5,2
5,0	—	—	—	0,748	0,895	8,53	6,5—40	5,0
6,0	6,0	1,600	3,300	0,680	0,848	9,38	17—50	7,0
6,0	—	—	—	0,718	0,868	9,14	7—45	5,9
7,0	7,0	1,800	3,800	0,666	0,840	9,47	25—50	7,8
7,0	—	—	—	0,736	0,867	9,10	10—45	7,1

1) Wiederbelastung erst nach einer Woche Belastung unter $\sigma_{11} = 2,10$ kp/cm².

2) Scherverformung $\Delta x = 10,0$ mm = $2 \times 5,0$ mm durch Umkehr des Schersinns.

2.4. Zusätzliche Versuche

In Ergänzung der beiden beschriebenen Versuchsreihen wurde ein Versuchspaar in der Art durchgeführt, daß an die Vorverdichtung bzw. an die Scherbeanspruchung eine Wiederbelastung im gleichen Versuchsgerät eingeschlossen wurde.

Vor dieser Wiederbelastung wurden die beiden Proben rasch und ohne Wasserzugabe entlastet.

Es ergaben sich keine grundsätzlichen Unterschiede, so daß daraus geschlossen werden kann, daß der Ausbau aus dem Vorverdichtungs- bzw. Schergerät, die Bearbeitung und der Wiedereinbau in Ödometer kleineren Querschnittes keine Störung der Proben, insbesondere hinsichtlich der Rekonstruierbarkeit des Vorverdichtungsdruckes, bedeuten.

Ein weiteres Versuchspaar wurde mit Quarzsand (85 Gewichtsprozent der Korngröße bis 0,06 mm, 15% < 0,06 mm) in ähnlicher Weise durchgeführt, wobei qualitativ die gleichen Ergebnisse erzielt wurden.

Eine Probe tonigen Schluffes, die unter 5 kp/cm² vorverdichtet worden war, wurde im Anschluß an eine Scherbeanspruchung unter konstanter Porenziffer durch neuerliche Belastung mit dem Vorverdichtungsdruck überverdichtet. Das Ergebnis des anschließenden Wiederbelastungsversuches in einem Ödometer zeigte die erwartete deutliche Verminderung der Zusammendrückbarkeit bei Belastungen bis zur Höhe des Vorverdichtungsdruckes gegenüber einem vergleichbaren Versuch ohne Überverdichtung. Aber auch in höheren Lastbereichen konnte eine deutliche Verminderung der Zusammendrückbarkeit festgestellt werden. Trotz dieses geänderten Verformungsverhaltens wurde aber bei Anwendung des Verfahrens von A. CASAGRANDE der gleiche Vorverdichtungsdruck ermittelt wie beim Vergleichsversuch ohne Überverdichtung.

3. Ergebnisse von Versuchen mit ungestörten Proben

3.1. Geologie des untersuchten Gebietes

Die untersuchten Proben stammen aus einer knapp 2 km langen Untersuchungsstrecke der Untergrundbahnlinie U-1 entlang der Favoritenstraße im 4. und 10. Wiener Bezirk. Es wurden die Ergebnisse von 31 Proben aus 14 Bohrungen ausgewählt. Das Gelände in diesem Bereich steigt von rund 190 m bis auf rund 220 m ü. d. M. Die Entnahmetiefen der Proben lagen zwischen 7 und 24 m.

Diese Schichten, deren Oberkante zwischen 4,6 und 18,5 m unter Gelände liegen, gehören dem Mittelpannon an. Es sind Sedimente des leicht brackischen Pannonsees.

Anhaltspunkte für den größtmöglichen Überlagerungsdruck, der in den untersuchten Schichten jemals wirksam gewesen sein kann, gibt die Spiegelhöhe dieses Sees unter der Annahme seiner gänzlichen Verlandung. Auf Grund geologischer Indizien [1], [2] kann diese Spiegelhöhe mit etwa + 350 m ü. d. M.,

maximal aber + 360 m ü. d. M. angenommen werden. Daraus lassen sich je nach den in Rechnung gestellten wirksamen Raumgewichten der Überlagerung Drücke von 13 bis 20 kp/cm² bei Wirksamkeit des Auftriebes und 24 bis 38 kp/cm² ohne Wirksamkeit des Auftriebes ableiten.

Eine Überprüfung der nach geologischen Kriterien denkbaren Überlagerungshöhe mit Hilfe bodenmechanischer Laboratoriumsversuche scheint aber deswegen sehr problematisch, weil sich mit diesen Methoden nur wirksame Drücke rekonstruieren lassen, für deren Zustandekommen jedoch die Kenntnisse über die wirksamen Raumgewichts-, Wasserdruck- bzw. Strömungsverhältnisse fehlen.

Zur Vervollständigung des Bildes der geologischen Situation des untersuchten Gebietes soll noch auf die tektonischen Vorgänge im Wiener Becken hingewiesen werden. Das System des Leopoldsdorfer Bruches wurde bei Tiefbohrungen in der Sarmatoberfläche rund 100 bis 130 m unter dem heutigen Gelände nur wenige hundert Meter östlich der Untersuchungsstrecke festgestellt. Die tektonischen Beanspruchungen, denen alle tertiären Sedimente ausgesetzt waren, dauerten mindestens bis ins Jungtertiär und führten zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Schichten, vor allem in horizontaler Richtung. In diesem Zusammenhang soll auf den Einfluß von tektonischen Beanspruchungen auf tonige Bodenschichten und deren Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften hingewiesen werden [20], [21].

3.2. Klassifizierung der untersuchten Proben

Von den 31 untersuchten Proben wurden zur Klassifizierung jeweils die Kornverteilungskurve und die Konsistenzgrenzen nach Atterberg bestimmt.

Einen Überblick über die dabei erhaltenen Ergebnisse gibt Tabelle 3. Es handelt sich also durchwegs um

Tabelle 5

Kennziffer		min.	max.	im Mittel	
Spez. Gewicht		g/cm ³	2,74	2,84	2,78
Atterberg-sche Kons. Gr.	Fließgrenze	%	29,0	59,0	45,5
	Ausrollgrenze	%	18,0	24,5	21,5
	Plast. Index	%	6,5	35,5	24,0
Kornver- teilung	Sand > 0,06 mm	%	5	17	8
	Schluff	%	71	89	81
	Ton < 0,002 mm	%	0	21	11

Schluffe mit Sandgehalten zwischen 3 und 17% und Tongehalten von 0 bis 21%. Die Beurteilung auf Grund des Plastizitätsdiagramms nach A. CASAGRANDE, welches den Zusammenhang zwischen dem Plastizitätsindex und der Fließgrenze angibt, zeigt, daß es sich im Durchschnitt um Tone mittlerer Plastizität handelt.

3.3. Versuchsgeräte und Versuchsvorgang

Bei den Ödometerversuchen wurden die gleichen Geräte des Innendurchmessers 5,75 cm wie bei den eigenen Versuchen verwendet. Die Zahl der Laststufen, die Belastungsdauer pro Laststufe und die Höchstlast entsprachen jenen der eigenen Versuche.

Bei den Versuchen des Typs „V 2“ und „H 2“, aus denen Moduln aus einer 1. und einer 2. Belastung ermittelt werden sollten, wurden ungünstige Versuchsbedingungen für die 2. Belastung, also Wasserzugabe vor der ersten Entlastung, gewählt, da die Moduln für praktische Zwecke herangezogen werden sollten.

3.4. Versuchsergebnisse und deren Diskussion

Insgesamt lagen zur Auswertung die Ergebnisse von 134 Einzelversuchen vor. Außer den bei allen 31 Proben durchgeführten Versuchen der Typen „V 1“, „H 1“, „V 2“ und „H 2“ wurden zusätzlich bei 11 Proben dann, wenn es die Größe der zur Verfügung stehenden Proben zuließ, Versuche des Typs „H“ mit horizontaler, jedoch gegenüber dem Versuch „H 1“ um 90° verdrehter Belastungsrichtung durchgeführt, um festzustellen, ob die Ergebnisse Richtungsabhängigkeiten in horizontaler Richtung erkennen lassen. Bei einer Probe kamen sogar 4 derartige Versuche zur Ausführung, deren horizontale Belastungsrichtungen jeweils um 45° verändert wurden.

Aus den 74 Versuchen zur Ermittlung des höchsten Vorverdichtungsdruckes (aus geologischer Überlagerung) bzw. des entsprechenden Wertes in horizontaler Richtung wurden nach 4 verschiedenen Verfahren Vorverdichtungsdrücke ermittelt. Es wurden die Verfahren von A. CASAGRANDE, OHDE, VAN ZELST und RUTLEDGE - HVORSLEV - SCHMERTMANN [9] angewendet. Von den meist unterschiedlichen vier Ergebnissen wurde jeweils der Mittelwert und der wahrscheinlichste Wert ausgewiesen. Aus dem Ergebnis der Versuche „V 1“ und dem derzeitigen Überlagerungsdruck wurde für jede Probe der Verdichtungsgrad

$$\alpha = \frac{p_v(V)}{\gamma \cdot t}$$

bestimmt.

Weiters wurde jeweils das Verhältnis des wahrscheinlichsten Wertes für die waagrechte zu jenem der lotrechten Belastungsrichtung errechnet. Dieses Verhältnis soll wieder β genannt werden.

Als Beispiele für die Versuchsergebnisse sind in den Abbildungen 5 und 6 die Druck-Porenziffer-Diagramme jener beiden Versuche des Typs „V 1“ bzw. „H 1“ dargestellt, bei denen der höchste bzw. der geringste Vorverdichtungsdruck festgestellt wurde. Eine Übersicht über die ermittelten Vorverdichtungsdrücke, die daraus errechneten Werte β und die sich ergebenden Werte des Verdichtungsgrades α gibt Tabelle 4. Es wurden jeweils die Minima, die Maxima und die Mittelwerte angegeben.

Die Werte des lotrechten Vorverdichtungsdruckes liegen durchwegs unter den oberen Grenzwerten, die

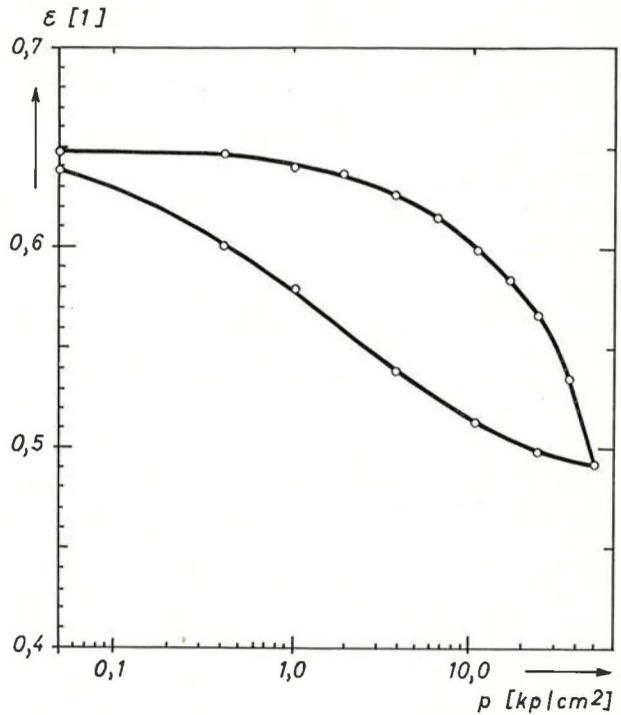


Abb. 5 Typisches Ergebnis eines Versuches „V 1“ mit hohem Vorverdichtungsdruck ($p_v(V) = 24,6 \text{ kp/cm}^2$).

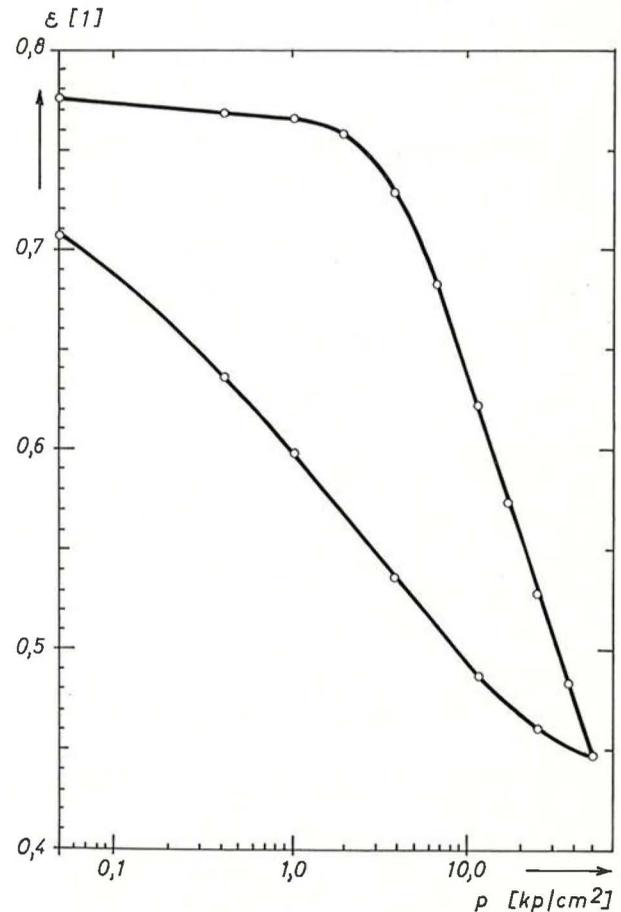


Abb. 6 Typisches Ergebnis eines Versuches „V 1“ mit niedrigerem Vorverdichtungsdruck ($p_v(V) = 4,4 \text{ kp/cm}^2$).

Tabelle 4

	$p_v(V)$ Versuche „V 1“	$p_v(H)$ Versuche „H 1“	$\beta = \frac{p_v(H)}{p_v(V)}$	$\alpha = \frac{p_v(V)}{\gamma \cdot t}$
Minim.	4,4	4,9	0,51	2,0
Maxim.	24,6	19,4	1,69	13,0
Mittelw.	17,7	14,0	0,79	7,0

sich aus der geologischen Situation ergeben, wenn man ein wirksames Raumgewicht von $2,0 \text{ Mp/m}^3$ annimmt. Bei den Versuchen „H“ mit verschiedenen Belastungsrichtungen konnten keine ausgeprägten Richtungsabhängigkeiten festgestellt werden.

Die Ergebnisse von β streuen innerhalb weiter Grenzen, liegen aber doch innerhalb des bodenmechanisch möglichen Bereiches. Der Seitendruck toniger Böden kann ja bei Annahme eines Winkels der inneren Reibung von $\varphi \doteq 25^\circ$ zwischen dem Wert des aktiven Erddruckes von $\sigma_h \text{ min} \doteq \lambda_a \cdot \sigma_v \doteq 0,4 \cdot \sigma_v$ und dem des passiven von $\sigma_h \text{ max.} = \lambda_p \cdot \sigma_v \doteq 2,5 \cdot \sigma_v$ schwanken. Die Ergebnisse von β lassen jedoch den Schluß zu, daß für die Spannungsverhältnisse zur Zeit der Überlagerung keine reinen Ruhedruckverhältnisse angenommen werden können.

Die Ergebnisse von α , die in Abb. 7 in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe der untersuchten Proben auf-

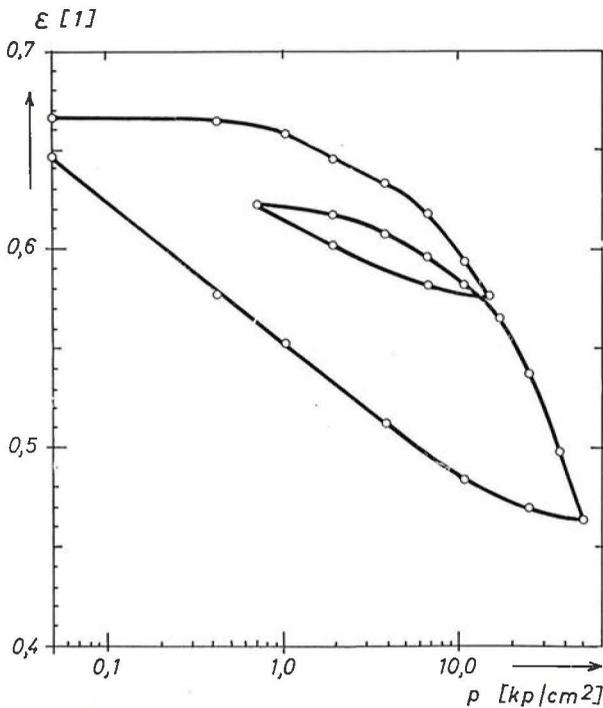


Abb. 7 Typisches Ergebnis eines Versuches „H 2“ mit hohem Vorverdichtungsdruck ($p_{v(H)} = 14,7 \text{ kp/cm}^2$).

getragen wurden, zeigen, daß die erhaltenen Werte dem erwarteten Ergebnis entsprechen, wonach der Verdichtungsgrad mit der Tiefe abnimmt und einem unteren Grenzwert zustrebt, wobei die Streuungen ebenfalls mit zunehmender Tiefe abnehmen.

Die für die Bestimmung der Vorverdichtungsdrücke notwendige Festlegung des Erstbelastungsbereiches der Druck-Porenziffer-Diagramme und die Ermittlung der Konstanten der Gleichung der Erstbelastungsgeraden zeigten in Übereinstimmung mit den eigenen Untersuchungen, daß der Kompressionsbeiwert C_v bei Untersuchung derselben Probe in lotrechter und waagrechter Richtung verschieden große Werte annimmt. Weiters wurde der Kompressionsbeiwert C_v des Erstbelastungsbereiches auch auf seine Abhängigkeit von charakteristischen Bodeneigenschaften, z. B. von der Plastizität, untersucht, wobei sich einerseits gewisse Abhängigkeiten von diesen Bodeneigenschaften, andererseits aber auch Unterschiede dieser Abhängigkeiten je nach Belastungsrichtung der Ödometerversuche ergaben.

Zwei Beispiele für Versuche des Typs „V 2“ bzw. „H 2“, also jener Versuche, die für die Ermittlung der Zusammendrückungsmoduln herangezogen wurden, geben die Abb. 8 und 9.

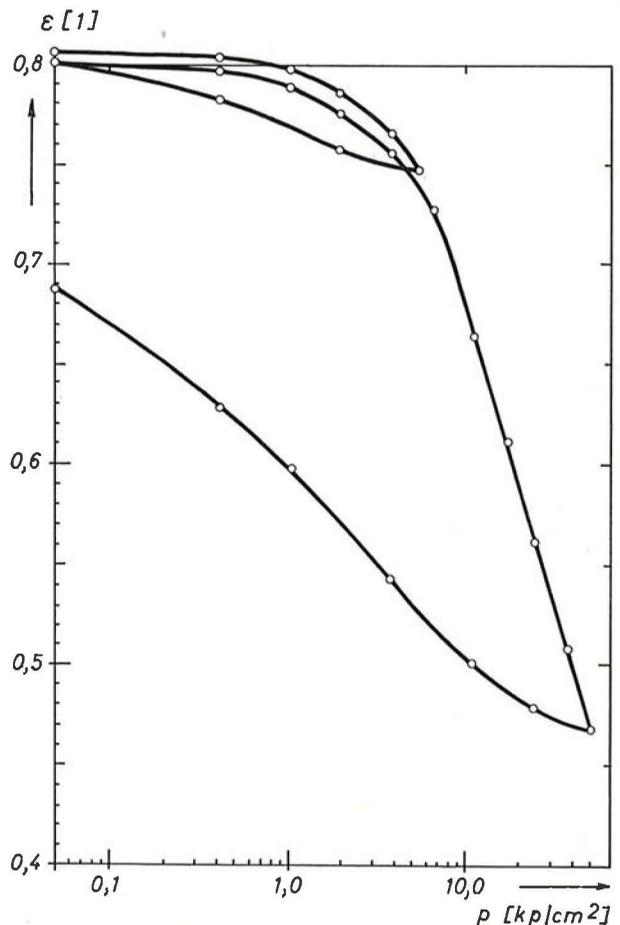


Abb. 8 Typisches Ergebnis eines Versuches „H 2“ mit niederem Vorverdichtungsdruck ($p_{v(H)} = 5,4 \text{ kp/cm}^2$).

Die Moduln wurden als Tangentenmoduln bei einer Vergleichsspannung von 3 kp/cm^2 bestimmt.

Die unteren und oberen Grenzen, innerhalb der sich die Ergebnisse bewegen, die Unterschiede zwischen den Moduln bei erster und zweiter Belastung sowie die

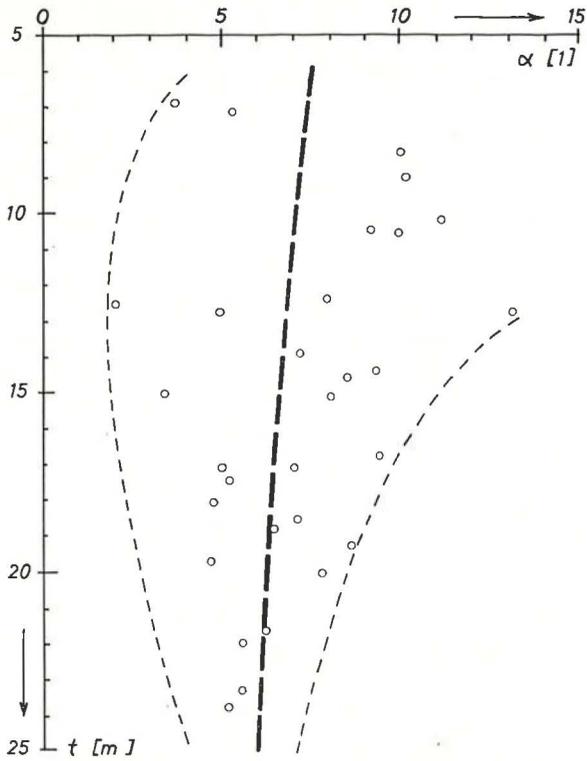


Abb. 9 Abhängigkeit des Verdichtungsgrades von der Entnahmetiefe der Proben.

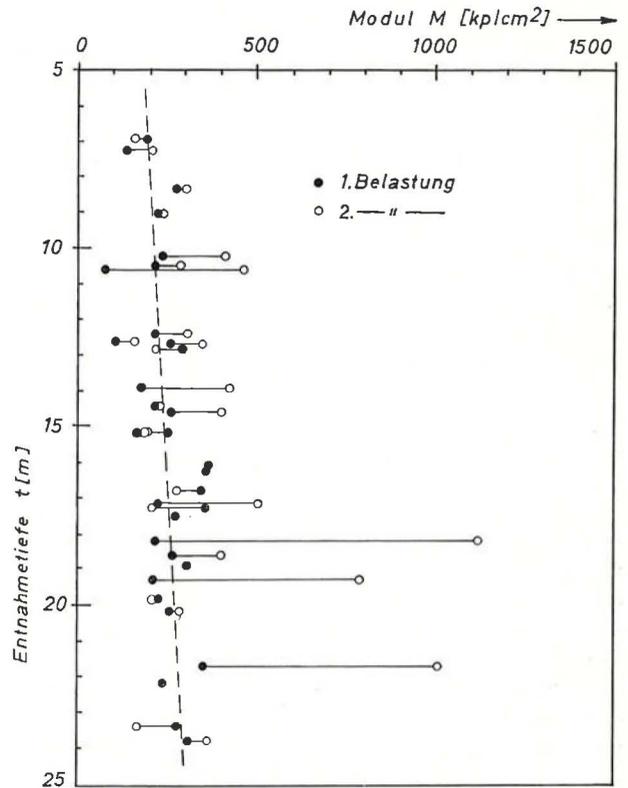


Abb. 10 Abhängigkeit der ermittelten Moduln von der Entnahmetiefe der Proben für die Versuche „V 2“.

Unterschiede, die sich aus der Veränderung der Belastungsrichtung ergeben, sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Es zeigte sich für beide Belastungsrichtungen

Tabelle 5

		Min.	Max.	Mittelwert	
Versuche „V 2“	Zusammendrückungsmoduln M [kp ² /cm ²]				+16% +53%
	erste Belastung M ₁	105	355	242	
	zweite Belastung M ₂	155	1120	362	
	prozentuelle Unterschiede [%]	-70	+420	+50	
Versuche „H 2“	Zusammendrückungsmoduln M [kp ² /cm ²]				
	erste Belastung M ₁	90	520	282	
	zweite Belastung M ₂	165	1455	480	
	prozentuelle Unterschiede [%]	-25	+380	+70	

bei der ersten Belastung eine Zunahme des Moduls mit wachsender Entnahmetiefe (Abb. 10).

Durch die Wahl ungünstiger Bedingungen für die zweite Belastung ergaben sich bei der Modulbestimmung größere Streuungen, die unter anderem durch Quellung der Proben bei der vorangegangenen Entlastung bedingt sein können.

Grundsätzlich rechtfertigen die erhaltenen Zunahmen der Moduln von durchschnittlich 50 bis 70% durch

eine zweite Belastung die Anwendung derartiger geänderter Versuchsmethoden. Allerdings waren durch die ungünstigen Versuchsbedingungen nicht immer Zunahmen, sondern in einigen Fällen auch Abnahmen des Moduls durch eine Ent- und nochmalige Belastung festzustellen.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Es ist seit langem bekannt, daß eine im Kompressionsapparat vorverdichtete gestörte Tonprobe bei ihrer Wiederbelastung über den höchsten Vorverdichtungsdruck hinaus eine deutliche Änderung ihrer Zusammendrückbarkeit zeigt. Diese Tatsache hat A. CASAGRANDE als erster dazu benützt, um auf die Höhe des größten Vorverdichtungsdruckes vorbeanspruchter ungestörter Tonproben aus Kompressionsversuchen zu schließen.

Umfangreiche Bodenuntersuchungen für den Bau des Untergrundbahnnetzes der Stadt Wien wurden in dieser Arbeit dazu verwendet, die Höhe der Vorverdichtung des Wiener Tegels festzustellen und mit jenen Werten zu vergleichen, die aus geologischen Betrachtungen abgeleitet werden können. Dabei ergab sich eine Reihe von Fragen, welche durch Laboratoriumsversuche mit gestörten Tonproben geklärt werden sollten. Die erste Frage war, ob durch die Entnahme und den Einbau einer Probe in die Versuchsapparatur eine so große Störung hervorgerufen wird, daß hiedurch

erhebliche Fehler bei der Bestimmung des Vorverdichtungsdruckes entstehen. Aus diesem Grund wurden vorverdichtete gestörte Tonproben aus dem Vorverdichtungsgerät ausgebaut, nach Zuarbeitung in kleinere Kompressionsapparate übertragen und wiederbelastet. Das Ergebnis dieser Versuche war, daß nach dem Verfahren von A. CASAGRANDE eine befriedigende Übereinstimmung mit der in diesem Fall bekannten Höhe des aufgebrachtten Vorverdichtungsdruckes festgestellt wurde.

Durch eine weitere Versuchsreihe mit gestörten Proben sollte die Höhe des Vorverdichtungsdruckes in horizontaler Richtung ermittelt werden. Die wiederum nach dem Verfahren von A. CASAGRANDE ermittelten horizontalen Vorverdichtungsdrücke ergaben sich im Mittel mit dem 0,85fachen Wert des aufgebrachtten lotrechten Vorverdichtungsdruckes. Wenn angenommen wird, daß durch die allseitige Entlastung beim Ausbau der Probe aus dem Vorverdichtungsgerät ein Porenwasserunterdruck in Höhe des Mittelwertes der bei der Erstverdichtung wirksamen Hauptspannungen aufgetreten ist, ergibt sich aus den Versuchsergebnissen das Verhältnis des waagrechten und lotrechten Vorverdichtungsdruckes mit 0,775. Dieser Wert liegt immer noch erheblich über den Angaben, welche in der Literatur für die Höhe des Ruhedruckes für erstverdichtete Tone zu finden sind. Um diesen Wert einer Überprüfung zu unterziehen, wurde eine unter einem Seitendruckverhältnis von 0,5 in einer Triaxialzelle vorverdichtete Probe in ähnlicher Weise wie bisher weiteruntersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung war, daß man mittels eines Wiederbelastungsversuches an einer vorverdichteten Probe mit einer zum Seitendruck parallelen Wiederbelastungsrichtung weder den Seitendruck noch den Mittelwert der drei Hauptspannungen des Vorverdichtungszustandes, sondern einen bestimmten Wert rekonstruieren kann, der im vorliegenden Fall bzw. beim verwendeten Material etwa dem 1,5fachen Seitendruck entspricht. Damit wurde grundsätzlich geklärt, welche Ergebnisse bei Wiederbelastungsversuchen in verschiedenen, von der Richtung der Vorbelastung abweichenden Richtungen zu erwarten sind.

Eine weitere Versuchsreihe mit gestörten Tonproben sollte den Einfluß von größeren Scherbeanspruchungen auf die Zusammendrückbarkeit des vorverdichteten Tones klären. Deshalb wurden konsolidierte Tonproben im direkten Scherversuch einer Scherbeanspruchung bis nahe an den Bruch unterworfen und nach dem Ausbau und Wiedereinbau in einen Kompressionsapparat das Druck-Porenziffer-Diagramm für die Wiederbelastung ermittelt. Aus den Versuchen geht klar hervor, daß durch die Scherbeanspruchung die Zusammendrückbarkeit des Tones bis zur Höhe der Vorbelastung vergrößert wird, daß sich hingegen bei Lasten, die den Vorverdichtungsdruck beträchtlich übersteigen, eine geringere Zusammendrückbarkeit ergibt. Die Zunahme der Zusammendrückbarkeit bei kleinen Belastungen kann zwanglos durch die beim Schervorgang aufgetretenen Kornumlagerungen erklärt werden. Ihre Abnahme in den höheren Lastbereichen widerlegt die weitverbreitete Meinung, daß eine den Vorverdichtungsdruck nicht übersteigende

Beanspruchung auf diesen Bereich keinen Einfluß ausüben kann.

Da Vergleichsversuche mit Sand zumindest im untersuchten Lastbereich bis knapp über den Vorverdichtungsdruck qualitativ zu den gleichen Ergebnissen führten, muß dieses Verhalten als eine den Korngerüsten von Kornanhäufungen eigentümliche Eigenschaft angesehen werden.

Hinsichtlich der Versuche mit ungestörten Tonproben soll zunächst festgehalten werden, daß die ausgeprägte Änderung des Druck-Zusammendrückungsverhaltens bei einem bestimmten Druck keinesfalls durch chemische oder ähnliche Einflüsse hervorgerufen sein kann. Diese Änderung ist vorwiegend mechanischen Einwirkungen beim Belastungsvorgang zuzuschreiben. Daher ist es möglich, aus dem Verhalten ungestörter Tonproben bei der Wiederbelastung auf den größten Vorverdichtungsdruck zu schließen, der jemals auf die untersuchten Bodenschichten gewirkt hat.

Es sei hier darauf hingewiesen, daß die Zylinderdruckfestigkeit von Tonproben von chemischen Einflüssen, die möglicherweise im Laufe der Zeit in den untersuchten Schichten wirksam waren, maßgebend verändert worden sein kann. Die Feststellung des lotrechten und waagrechten Vorverdichtungsdruckes aus Kompressionsversuchen hingegen liefert Angaben über die rein mechanischen Beanspruchungen, insbesondere über die Art der wirksamen Spannungszustände, unter denen die Bodenschichten zur Zeit der Überlagerung gestanden waren.

Die Ergebnisse der Versuche mit ungestörten Tonproben zeigen deutlich, daß die üblichen Vorstellungen von der Sedimentation solcher Böden zu stark vereinfacht sind. Es darf von vornherein nicht angenommen werden, daß bei der Ablagerung der Böden die Bodenoberfläche horizontal verlief. Können in den abgelagerten Schichten in dem an die Sedimentation anschließenden Zeitabschnitt Strömungsdrücke und Porenwasserüberdrücke wirksam gewesen sein, welche zum Zeitpunkt des beginnenden Wiederabtrags noch nicht vollkommen abgeklungen waren, so mögen später Änderungen des wirksamen Raumgewichtes durch Absinken des Grundwasserspiegels, Austrocknungsvorgänge oder Scherbeanspruchungen hinzugekommen sein, welche die Struktur des Bodens örtlich verändert haben.

Schon auf Grund dieser Überlegungen wird man nicht erwarten können, daß die an einer größeren Anzahl von ungestörten Proben festgestellten lotrechten und waagrechten Vorverdichtungsdrücke in engen Grenzen übereinstimmen.

Trotz der bei den Versuchen mit ungestörten Proben festgestellten großen Streuungen können aber folgende allgemeine Aussagen gemacht werden:

Geht man von der auf Grund der geologischen Situation geschätzten größtmöglichen Überlagerungshöhe aus, so liegen die aus dem Druck-Porenziffer-Diagramm ermittelten Vorverdichtungsdrücke immer unterhalb jener Werte, welche der geologischen Überlagerungshöhe bei Annahme eines wirksamen Raumgewichtes von $2,0 \text{ Mp/m}^3$ entsprechen. Wenn man von einigen

Ausnahmen sehr niedriger Werte absieht, liegen die Ergebnisse nahe dieser oberen Grenze.

Das Verhältnis der ermittelten lotrechten und waagrecht Vorverdichtungsdrücke streute erheblich, lag jedoch immer zwischen den Grenzwerten des aktiven und passiven Erddruckbeiwertes. Im Mittel ergab sich dieses Verhältnis mit 0,79, wobei dieser Wert recht gut mit dem bei den eigenen Laboratoriumsversuchen ermittelten Wert übereinstimmt.

Die zur Ermittlung von Zusammendrückungsmoduln für praktische Zwecke zusätzlich durchgeführten Versuche mit einer Ent- und nochmaligen Belastungsschleife ergaben bei waagrecht Belastung eine geringere Verformbarkeit als bei lotrechter. Eine Zunahme

des Moduls mit zunehmender Entnahmetiefe der untersuchten Proben wurde bei beiden Belastungsrichtungen festgestellt. Die aus der zweiten Belastung ermittelten Moduln erwiesen sich bei beiden Untersuchungsrichtungen gegenüber jenen der ersten Belastung als beträchtlich größer. Trotz der vielen Einflüsse, denen die untersuchten Bodenschichten seit ihrer höchsten Beanspruchung durch Überlagerung und deren Wiederabtragung ausgesetzt waren, und der dadurch möglicherweise eingetretenen Veränderungen, standen die Ergebnisse der durchgeführten Versuche doch in befriedigender Übereinstimmung mit den geologischen Überlegungen und lieferten zusätzliche Informationen über die Verhältnisse, die zur Zeit der größten Überlagerung geherrscht haben können.

Schrifttum

- [1] KÜPPER, H.: Geologie von Wien (Kurzfassung 1964), Verlag Brüder Hollinek, Wien, Verlag Brüder Borntraeger, Berlin, 1965.
- [2] BRIX, F.: Naturgeschichte Wiens, Band 1, Abschnitt Geologie, Geomorphologie und Geophysik, Verlag für Jugend und Volk, Wien, München, 1970.
- [3] TERZAGHI, K. v.: Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Verlag Fr. Deuticke, Leipzig und Wien, 1925.
- [4] MUHS, H./KANY, M.: Einfluß von Fehlerquellen beim Kompressionsversuch, Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe D, Nr. 7, Part. 1, Mitt. Inst. DEGEBO, H. 9, 1954.
- [5] VAN ZELST, TH.: An Investigation of the Factors affecting Laboratory Consolidation of Clay, Proc. II. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Bd. 7, Disc. 6, Rotterdam, 1948.
- [6] STEINFELD, K.: Zur Gründung von 60geschossigen Hochhäusern in Hamburg, Vorträge der Baugrundtagung 1968 Hamburg, Essen, 1969.
- [7] BRINCH-HANSEN, J./LUNDGREN, H.: Hauptprobleme der Bodenmechanik, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1960.
- [8] CASAGRANDE, A.: The Determination of the Pre—Consolidation load and its Practical Significance, Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Bd. 3, Harvard Univ., 1936.
- [9] SCHULTZE, E./MUHS, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 2. Aufl., 1967.
- [10] KOTZIAS, P.: Die Zusammendrückbarkeit von Schluff, Mitt. a. d. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik, T.H. Aachen, H. 28, 1963.
- [11] WAGNER, H.: Verkehrstunnelbau, Bd. I, Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin, München, 1968.
- [12] SZECHY, K.: Tunnelbau, Springer-Verlag, Wien/New York, 1969.
- [13] FROSS, M.: Über die Vorbelastung toniger Böden des Wiener Beckens, Diss., T.H. Wien, 1972.
- [14] HVORSLEV, J.: Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden, Diss., Wien, 1936.
- [15] HONDL, A.: Änderungen der Festigkeitseigenschaften eines Bodens durch Zuzumischen von Kalkhydrat, Diss., Wien, 1964.
- [16] TERZAGHI, K. v.: Festigkeitseigenschaften der Schüttungen, Sedimente und Gele, Handbuch der Physik. und Techn. Mechanik, Bd. IV, 2. Hälfte Techn. Physik der festen Körper, Verlag J. A. Barth, Leipzig, 1931.
- [17] BISHOP, A. W./HENKEL, D. J.: The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 1957.
- [18] BJERRUM, L./ANDERSEN, K. H.: In—Situ Measurement of Lateral Pressure in Clay, Proc. 5th Europ. Conf. Soil Mech. Found. Engg. Vol. I, Madrid, 1972.
- [19] BOROWICKA, H.: Der Wiener Routine-Scherversuch, Mitt. d. Inst. f. Grundbau u. Bodenmechanik, T.H. Wien, H. 5, 1963.
- [20] WOLTERS, R.: Vorbeanspruchung auf Ton, Vorträge der Baugrundtagung 1970 in Düsseldorf, Essen 1970 und
- [21] SCHULTZE, E.: Korreferat zum Vortrag Wolters.