

Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch

Anhand von spannungsgesteuerten Kompressionsversuchen kann das Verformungsverhalten weicher Böden wirklicheren näher beschrieben werden, da durch die Wahl einer geeigneten Spannungsrate eine Ähnlichkeit zu den Belastungsbedingungen in situ vorliegt. Die Versuchsergebnisse werden in kontinuierlichen Kurven dargestellt, die eine lückenlose Interpretation der Versuchsergebnisse ermöglichen. Die Versuchsdauer wird dabei maßgeblich reduziert.

Im vorliegenden Beitrag werden die mathematischen Grundlagen in kontinuierlichen Kurven dargestellt, die eine lückenlose Interpretation der Versuchsergebnisse ermöglichen. Außerdem werden die Versuchsdauer, labor- und bodenmechanischen Grundlagen zur Ausführung von spannungsgesteuerten Kompressionsversuchen dargestellt. Versuchsergebnisse von aufbereiteten Kaolin- und ungestörten Seetonproben werden ebenfalls präsentiert und mit den Ergebnissen des Standardkompressionsversuchs verglichen. Schließlich wird eine Modellierung des geschwindigkeitsabhängigen Kompressionsverhaltens vorgestellt.

Constant rate of loading consolidation tests on soft soils. *The one-dimensional consolidation tests under constant rate of loading (CRL-test) have the ability to describe the behaviour of soft soils realistically because of its similarity to the field loading conditions. The test results can be presented in continuous curves, which enable a steeples Interpretation of the test results. Moreover the testing time will be enormously reduced.*

In the present paper the mathematical and the procedural basics are presented in order to carry out the CRL-test. Test results of remoulded kaolin as well as undisturbed lacustrine clay are shown and compared to the results from the incremental loading consolidation tests (IL-Test). Finally a modelling of the compressibility behaviour depending on the loading rate will be presented.

1 Einleitung

Seit Jahrzehnten stellt der Kompressionsversuch im sogenannten Oedometergerät (KD-Versuch) fast das einzige Verfahren zur Untersuchung des eindimensionalen Verformungsverhaltens bindiger Böden dar. In der Praxis hat sich der Kompressionsversuch mit inkrementeller Belastung trotz dessen Nachteile, wie z. B. Einfluss des Lastinkrements und der Belastungsdauer auf die ermittelte Steifigkeit, durchgesetzt und wurde in den nationalen und internationalen Normen (DIN 18135, BS 1377-5, ASTM D-2435, usw.) geregelt. Dies ist auf die einfache erforder-

liche Labortechnik sowie auf die unkomplizierte bodenmechanische Interpretationsgrundlage nach der klassischen Konsolidationstheorie zurückzuführen.

In monoton beanspruchten Kompressionsversuchen (spannungs- bzw. verformungsgesteuerte Versuche) kann das Verformungsverhalten weicher Böden wirklicheren näher beschrieben werden, da insbesondere bei spannungsgesteuerten Versuchen eine Ähnlichkeit zu den Belastungsbedingungen in situ vorliegt. Die Versuchsergebnisse werden in kontinuierlichen Kurven dargestellt, die eine lückenlose Interpretation der Versuchsergebnisse ermöglichen [3]. Außerdem kann eine erhebliche Reduzierung der Versuchsdauer erreicht werden. Trotz aller Vorteile fanden solche Versuche, wenigstens auf nationaler Ebene, bis heute keine praktische Anwendung. Dies kann durch folgende Punkte begründet werden:

- Zusätzliche Laborausstattung zur automatisierten Datenerfassung und Messung von Verformungen und Porenwasserüberdrücken ist erforderlich.
- Die mathematischen Grundlagen sind nicht immer bekannt.
- Es sind Unsicherheit bei der Durchführung und Interpretation solcher Versuche vorhanden.
- Es gibt kein Regelwerk für spannungs- bzw. verformungsgesteuerte Kompressionsversuche.

Demgegenüber erfüllt heute jedes moderne Bodenmechaniklabor die Anforderungen unter dem ersten Punkt. Die Punkte 2 und 3 werden im vorliegenden Beitrag behandelt. Dabei werden die mathematischen und ausführungstechnischen Grundlagen für spannungsgesteuerte Kompressionsversuche (CRL-Versuche: engl. Constant Rate of Loading Test) dargestellt. Versuchsergebnisse von aufbereiteten Kaolin- und ungestörten Seetonproben werden ergänzend mitgeteilt und mit den Ergebnissen des Standardkompressionsversuchs verglichen.

Für die verwendeten Kaolin- und Seetonproben sind die bodenmechanischen Kenngrößen zur Klassifizierung und Beschreibung der Zustandsform in Tabelle 1 zusammengestellt.

Ergänzend wurde anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse eine Modellvorstellung zum geschwindigkeitsabhängigen Kompressionsverhalten entwickelt, mit dem der Zusammenhang zwischen Spannungen, Verformungen und der Belastungszeit bzw. der Spannungsrate hergestellt werden kann.

Tabelle 1. Bodenmechanische Kenngrößen der verwendeten Kaolin- und Seetonproben
 Table 1. Soil parameters of the used kaolin and the lacustrine clay

Boden	w [%]	w _L [%]	w _P [%]	I _p [%]	T/U/S [%]	ρ _s [t/m ³]
Seeton (Mittelwerte)	35,5	38,5	20,5	18,0	42/53/5	2,74
Kaolin	-	36	23,8	12,2	30/60/10	2,71

2 Nachteile des konventionellen Kompressionsversuchs

Im Standardkompressionsversuch wird das Bodenverhalten durch die Belastungsdauer und das Lastinkrement beeinflusst. Konventionell wird die Last gemäß dem Inkrement $\Delta\sigma/\sigma = 1$ in jeder Stufe nach 24 Stunden verdoppelt. Diese Vorgehensweise ist für die Praxis vor allem aus laborbetrieblichen Gründen so festgesetzt, damit bei relativ geringem Aufwand die Verformungs- und Konsolidationsparameter gewonnen werden können.

Häufig wird die Konsolidation von Bodenproben nach kurzer Zeit (z. B. 2,0 bis 4,0 Stunden für den Seeton) aufgrund der geringen Probenhöhe abgeschlossen, so dass die Verformungen innerhalb der übrigen Belastungsdauer durch das Kriechen verursacht werden. Dies kann einen erheblichen Einfluss auf die Ermittlung der Steifigkeit des Bodens und somit auf eine Setzungsprognose haben.

Die Beeinflussung der Belastungsdauer kann demgegenüber anhand von sogenannten EOP-Kompressionsversuchen (engl.: End of Primary Consolidation) minimiert werden, indem die Verformungen am Ende der Konsolidation für die Druck-Setzungslinie zugrunde gelegt werden. Dadurch wird eine Druck-Verformungslinie abgeleitet, die so weit wie möglich nur Konsolidationsverformungen be-

inhaltet, so dass die Steifigkeit des Bodens unabhängig von den Kriechverformungen ermittelt werden kann.

Beispielhaft sind in Bild 1 die Druck-Verformungslinien mit den abgeleiteten Steifemoduln aus Ergebnissen der Standard- und EOP-Kompressionsversuche an ungestörten Seetonproben dargestellt.

Der Einfluss des Lastinkrements auf das Verformungsverhalten wurde anhand von EOP-Kompressionsversuchen vergleichend mit den Inkrementen $\Delta\sigma/\sigma = 1$ und $\Delta\sigma/\sigma = 0,1$ an Seeton untersucht. Die EOP-Verformungen für jede Laststufe wurden nach dem bekannten Verfahren von Taylor [7] ermittelt. Bild 2 zeigt Versuchsergebnisse für die Laststufe 62,5 bis 125 kN/m² im Bereich der Erstbelastung. Die durch geringe Lasterhöhung gewonnene effektive Spannungs-Setzungslinie bzw. Spannungs-Porenzahl-linie kann nun mit der effektiven Spannungs-Setzungslinie einer verdoppelten Laststufe aus dem Standardkompressionsversuch bzw. dem EOP-Versuch verglichen werden.

Quantitativ lässt sich somit der Einfluss des Lastinkrements auf die Steifigkeit z. B. durch die Gegenüberstellung der Kompressionsbeiwerte $C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'$ beschreiben. Hierbei werden anhand von Bild 2 die C_c -Werte aus dem Standardkompressionsversuch (Pfad AD), EOP-Standardkompressionsversuch (Pfad AC) mit $\Delta\sigma/\sigma = 1$ und EOP-Versuch (Pfad AB) mit $\Delta\sigma/\sigma = 0,1$ für eine Gesamtlaststufe verglichen. Die ermittelten Korrekturbeiwerte κ sind ebenfalls in Bild 2 dargestellt.

Wird für den untersuchten Seeton davon ausgegangen, dass die Probe ausgehend von der Ausgangsspannung nur mit dem halben Inkrement ($\Delta\sigma/\sigma = 0,5$) bezogen auf die Versuchskurve ($\Delta\sigma/\sigma = 0,1$) belastet wird, so beträgt der Kompressionsbeiwert C_c aus dem EOP-Versuch mit kleinem Inkrement (Pfad AB') 0,096 und der Korrekturbeiwert 0,73, siehe Bild 2. Dagegen bleiben die Kompressionsbeiwerte aus den Standard- und EOP-Versuchen un-

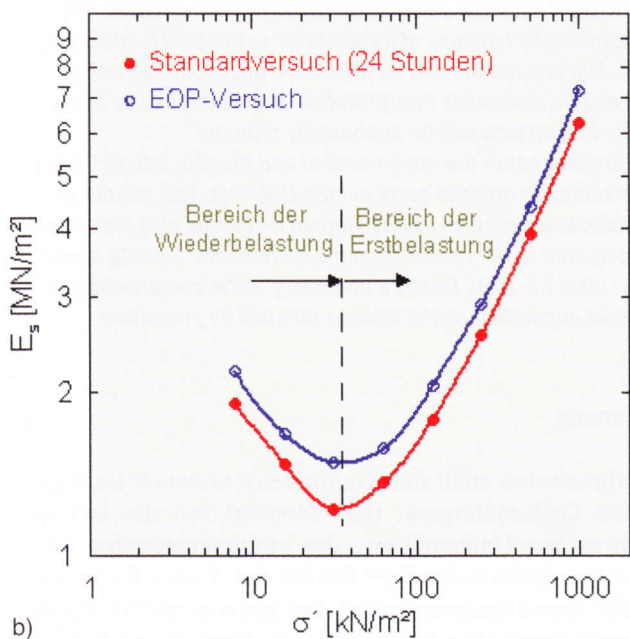
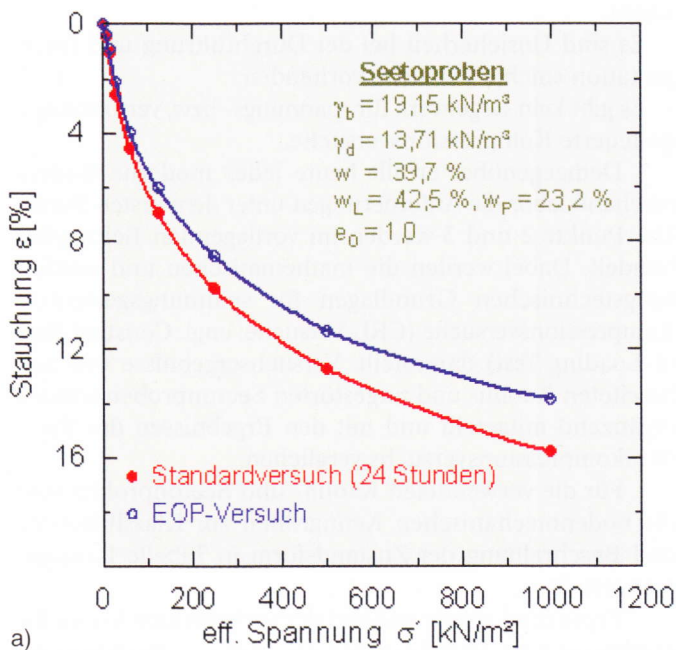
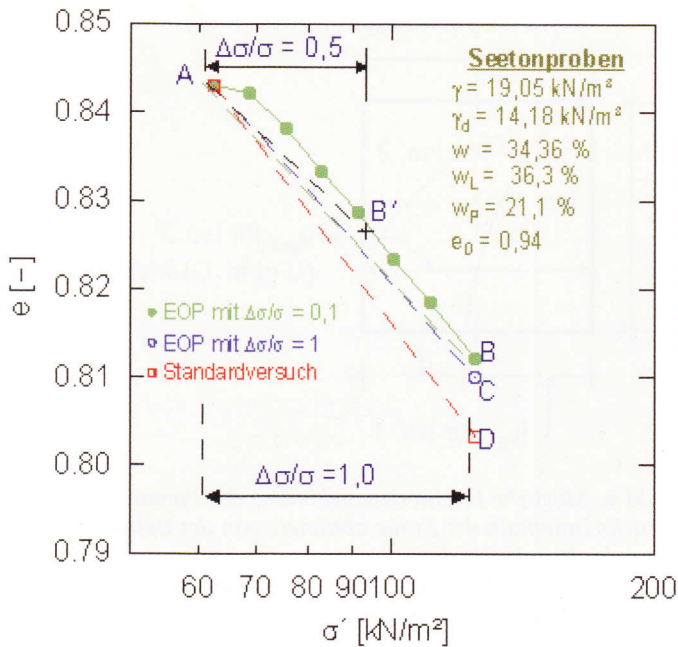


Bild 1. Standard- und EOP-Kompressionsversuche an ungestörten Seetonproben, a) Druck-Verformungslinien, b) Druck-Steifemodullinien
 Fig. 1. Standard and EOP-consolidation tests on undisturbed samples of lacustrine clay, a) stress-strain lines, b) stress-constrained modulus lines



Kompressionsversuch	C_c [-]	κ [-]
Standard	0,132	1,00
EOP mit $(\Delta\sigma/\sigma = 1)$	0,111	0,84
EOP mit $(\Delta\sigma/\sigma = 0,1)$	0,103	0,78
EOP mit $(\Delta\sigma/\sigma = 0,1)$	0,096	0,73
[bezogen auf pkt. B']		

Bild 2. C_c -Werte aus Standard- und EOP-Kompressionsversuchen mit unterschiedlichen Inkrementen und Korrekturbeiwerten κ bezogen auf den Standardkompressionsversuch

Fig. 2. C_c -values from standard and EOP-consolidation tests with different increments and correction factors κ referring to the standard compression test

verändert, da der tatsächliche Pfad AB' mit diesen Versuchen nicht erfasst werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Verformungsverhalten im Kompressionsversuch vom gewählten Spannungsincrement abhängig wird, wobei wie bereits ausgeführt festzustellen ist, dass das Standardinkrement ($\Delta\sigma/\sigma = 1$) willkürlich festgesetzt ist.

Der Standardversuch beschreibt damit ein Verformungsverhalten bei schlagartig verdoppelter Lastaufbringung, was in situ nicht zutreffend ist, da bei praktischen Bauaufgaben die Randbedingungen der Lastverdopplung nicht vorliegen.

3 Spannungsgesteuerte Kompressionsversuche

3.1 Allgemeines

Obwohl die EOP-Kompressionsversuche mit kleinem Lastinkrement das Verformungsverhalten von weichen Böden zutreffend beschreiben können, ist deren praktische Durchführung in herkömmlichen Kompressionsgeräten äußerst schwierig und mit sehr hohem Aufwand verbunden, da sie mehrere Wochen dauern können. Als Alternative bieten sich die monotonbeanspruchten Kompressionsversuche an, die eine erhebliche Reduzierung der Versuchsdauer ermöglichen.

3.2 Bodenmechanische Grundlagen zur Auswertung der CRL-Versuche

Mit der Annahme, dass die Durchlässigkeit und der Konsolidationsbeiwert während der Konsolidation konstant bleiben, wurde in [5] für die Konsolidation unter zeitabhängiger Belastung die Differentialgleichung

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{d\sigma_v}{dt} \quad (1)$$

vorgeschlagen. Für eine konstante Belastungsrate ($d\sigma_v/dt = C$) konnte nach [1] folgende analytische Lösung für die Gl. (1) entwickelt werden

$$\frac{u}{\sigma_v} = \frac{16}{\pi^3 T_v} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin \frac{n\pi z}{2\ell_d} \left[1 - \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \right], \quad (2)$$

mit ℓ_d als längster Dränageweg. Bei CRL-Versuchen mit einseitiger Entwässerung kann der Porenwasserdruck an der undurchlässigen Seite gemessen und in Gl. (2) eingesetzt werden, so dass sich der normierte Zeitfaktor T_v für beliebige Zeit ergibt. Danach lässt sich der Konsolidationsbeiwert durch die bekannte Gl. (3) errechnen:

$$c_v = \frac{T_v \cdot \ell_d^2}{t} \quad (3)$$

Um die gemittelten effektiven Spannungen innerhalb der Probe zu erhalten, muss der mittlere Konsolidationsgrad U bestimmt werden. Dafür wurde die Gleichung

$$U = 1 - \frac{1}{\sigma_v \cdot \ell_d} \int_0^{\ell_d} u dz = 1 - \frac{32}{\pi^4 T_v} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^4} \left[1 - \exp\left(-\frac{(2m+1)^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \right] \quad (4)$$

abgeleitet, welche die Berechnung der gemittelten effektiven Spannungen nach der Gleichung

$$\sigma'_v = U \cdot \sigma_v \quad (5)$$

zu jedem Zeitpunkt ermöglicht. Daraus lässt sich wiederum die Druck-Setzungs- bzw. Druck-Verformungslinie bestimmen.

3.3 Ausführungstechnischen Grundlagen der CRL-Versuche

Spannungsgesteuerte Kompressionsversuche können entweder im Oedometer oder im Triaxialgerät unter K_0 -Bedingung durchgeführt werden. Unter K_0 -Bedingung steht ein Bodenelement unter dem Ruhedruckzustand, d. h., $\sigma'_3 = K_0 \cdot \sigma'_1$, wobei K_0 der Erdruhedruckbeiwert ist. Wenn die vertikale und horizontale Spannung so vergrößert werden, dass das Verhältnis $\sigma'_3/\sigma'_1 = K_0$ immer erfüllt wird, treten nur vertikale Verformungen ϵ_1 auf.

Im Triaxialgerät wird die Probe mit vertikaler, konstanter Spannungsrate belastet und die radiale Spannung (Zellendruck) so gesteuert, dass keine radialen Verformungen ϵ_3 eintreten können. Die radiale Verformung kann mit einem Radialsensor ständig erfasst werden. Dementsprechend reagiert das Zellendruckventil der Triaxialzelle (Bild 3), wobei der gesamte Versuch voll automatisiert und programmieretechnisch begleitet werden kann. Die detaillierte Vorgehensweise ist in [6] ausführlich dargestellt.

Die Bestimmung des mittleren Porenwasserüberdrucks innerhalb der Probe nach Gl. (4) mit nur einem Messwert setzt nach Bild 4 voraus, dass der gemessene Porenwasserüberdruck u_{gem} stets kleiner als die aufgebrachte Last (Isochrone 1) sein muss, da sich sonst der Porenwasserüberdruck durch zu schnelle Belastung oder kleine Durchlässigkeit gemäß Isochrone 2 in der Probe ausbilden kann, so dass die Ermittlung von \bar{u} nach Gl. (4) unscharf wäre.

Die Belastungsrate ist ein wesentlicher Einflussfaktor bei den CRL-Versuchen. Wird die Probe zu schnell belastet, steigt der Porenwasserdruck stark an, was zu unkontrollierbarer Verteilung der effektiven Spannungen in der Probe führen kann. Wird dagegen zu langsam belastet, ergeben sich niedrige Porenwasserdruckwerte, die nicht genau gemessen werden können.

Um eine geeignete Belastungsrate auszuwählen, bei der eine weit in der Probe lokalisierte Isochrone (Iso. 2) vermieden wird, kann als erste Näherung auf die Ergebnisse

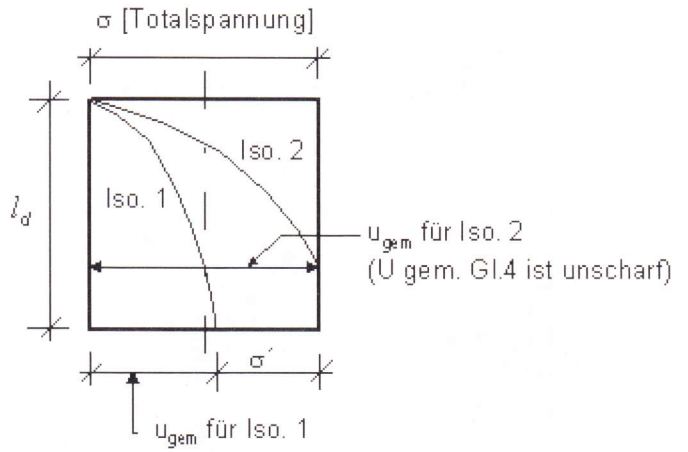


Bild 4. Mögliche Isochronenausbildung des Porenwasserüberdrucks innerhalb der Probe abhängig von der Belastungsrate und der Durchlässigkeit
 Fig. 4. Possible locations of the isochrones of the excess pore pressure within the sample dependent on the loading rate and the permeability

in [8] zurückgegriffen werden, worin für Versuche mit einseitigem Dränageweg die Belastungsrate abhängig von der Fließgrenze gegeben ist. Mit Zunahme der Fließgrenze des Bodens reduziert sich die aufzubringende Belastungsrate, da in der Regel geringere Durchlässigkeitsbeiwerte zu erwarten sind, siehe Bild 5.

Außerdem kann die Voraussetzung $u_{gem} < \sigma_v$ im Laufe des Versuchs immer überprüft werden um zu kontrollieren, ob die Anforderung nach Bild 4 zu berücksichtigen ist.

In [4] findet sich ein praxisorientiertes Verfahren unter Berücksichtigung des Setzungsverhaltens ausgeführter Projekte im süddeutschen Raum zur Abschätzung einer geeigneten Spannungsrate in den CRL-Versuchen auf der Grundlage der Dimensionsanalyse. Mit diesem Verfahren

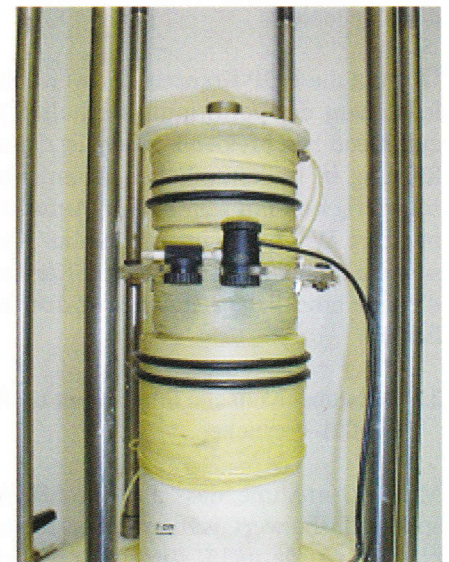
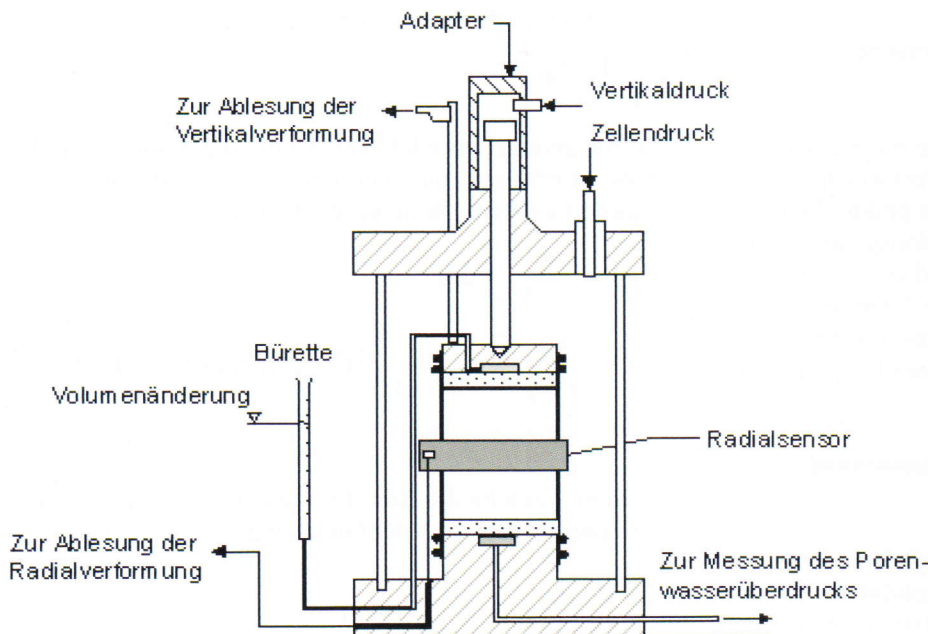


Bild 3. Triaxialzelle mit Radialsensor für Kompressionsversuche unter K_0 -Bedingung
 Fig. 3. Triaxial cell equipped with radial transducer for compression tests under K_0 -conditions

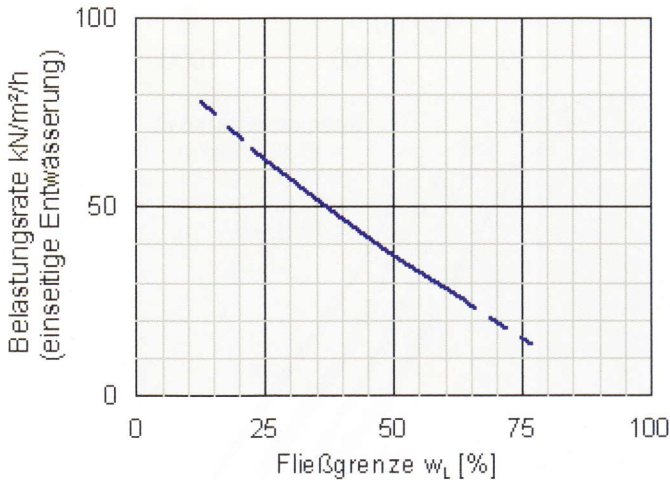


Bild 5. Empfohlene Belastungsrate in Abhängigkeit von der Fließgrenze nach [8]
 Fig. 5. Recommended loading rate according to the liquid limit after [8]

wurde z. B. für den Seeton eine Spannungsrate von 80 bis 140 $kN/m^2/h$ vorgeschlagen. Setzungsprognosen mit Hilfe von CRL-Versuchen unter den o. g. Bedingungen stimmen sehr gut mit vorliegenden Setzungsmessungen überein.

4 Ergebnisse der CRL-Versuche

Bild 6 zeigt die Druck-Porenzahlkurven einer Seetonprobe, die im Oedometergerät mit einer Spannungsrate von 100 $kN/m^2/h$ belastet wurde. Für den gleichen Ton liegt auch ein Standardkompressionsversuch vor, dessen Ergebnisse ebenfalls in Bild 6 dargestellt sind. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Seeton unter der gewählten Spannungsrate geringere Verformungen und demzufolge größer Steifigkeit aufweist. Dies kann quantitativ durch den C_c -Wert beschrieben werden, der beim CRL-Versuch

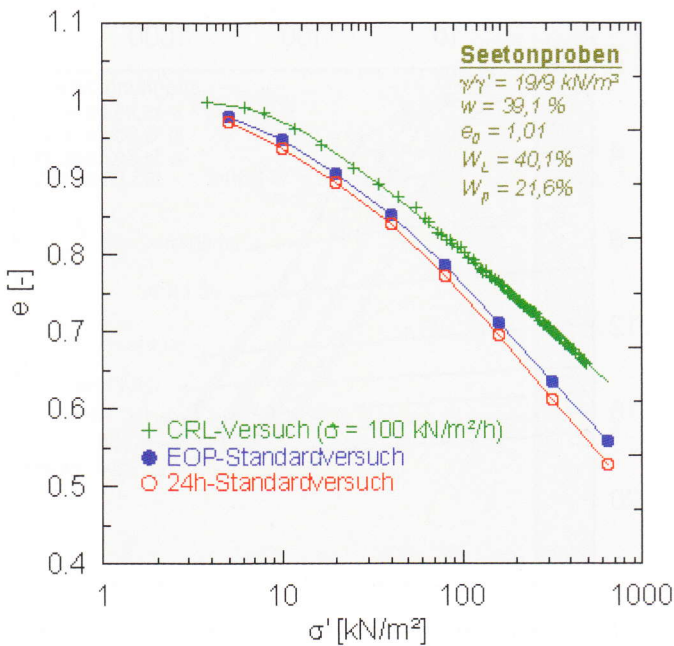
ca. 25 % geringer ist. Mit diesem Ergebnis konnten die Diskrepanzen geklärt werden, die bei Setzungsprognosen von Ausführungsprojekten in Süddeutschland beobachtet wurden [6].

Das Bodenverhalten in CRL-Versuchen hängt eindeutig von der Spannungsrate ab. In Bild 7 zeigen die Ergebnisse einer Versuchsreihe unterschiedliche Druck-Verformungslinien und demzufolge verschiedene Steifigkeitswerte, obwohl der Boden mit der gleichen effektiven Spannung beansprucht wird. Mit Zunahme der Spannungsrate reagiert der Boden steifer, wobei dieses Verhalten in der Anfangsphase besonders deutlich zu beobachten ist.

In Bild 7b sind auch die Zeit-Setzungs- und Zeit-Porenwasserdrucklinien aufgetragen. Der Porenwasserüberdruck Δu steigt in der Anfangsphase an und erreicht einen Maximalwert. Trotz weiterer Spannungszunahme fällt der Porenwasserüberdruck danach ab. Außerdem ist zu erkennen: Je schneller die Belastung aufgebracht wird, um so größer ist der aufgebaute Porenwasserüberdruck. Nach Ansicht der Verfasser wird die Zusammendrückbarkeit des Bodens durch den in der Anfangsphase entstehenden Porenwasserüberdruck so „gebremst“, dass der Boden bei großen Spannungsraten geringere Verformungen aufweist und somit eine größere Steifigkeit besitzt. Dieses Verhalten kann die unterschiedlichen Verläufe und Krümmungen der Druck-Verformungslinien in der Anfangsphase erklären. Erst wenn die Abbauphase des Porenwasserüberdrucks anfängt, zeigt der Boden ähnliches Verhalten, so dass alle Druck-Verformungslinien annähernd parallel zueinander verlaufen.

Unter gleichen Randbedingungen wurden auch Standardkompressionsversuche im Triaxialgerät mit verdoppelter Lasterhöhung durchgeführt. Entsprechend den Verformungen nach 24 Stunden und nach Abbau des Porenwasserüberdrucks (EOP) ergaben sich zwei Standardlinien.

Im Vergleich zum Standardkompressionsversuch verhält sich der Boden in den CRL-Versuchen besonders in der Anfangsphase steifer, wobei gemäß Abschn. 2 zu er-



Kompressionsversuche	C_c [-]
24h-Standard	0,275
EOP-Standard	0,250
CRL ($\dot{\sigma}_v = 100 \text{ kN/m}^2/h$)	0,205

Bild 6. Beispielhafter Vergleich von Standard- und CRL-Versuchen an Seeton
 Fig. 6. Exemplary comparison between standard- and EOP-Test on lacustrine clay

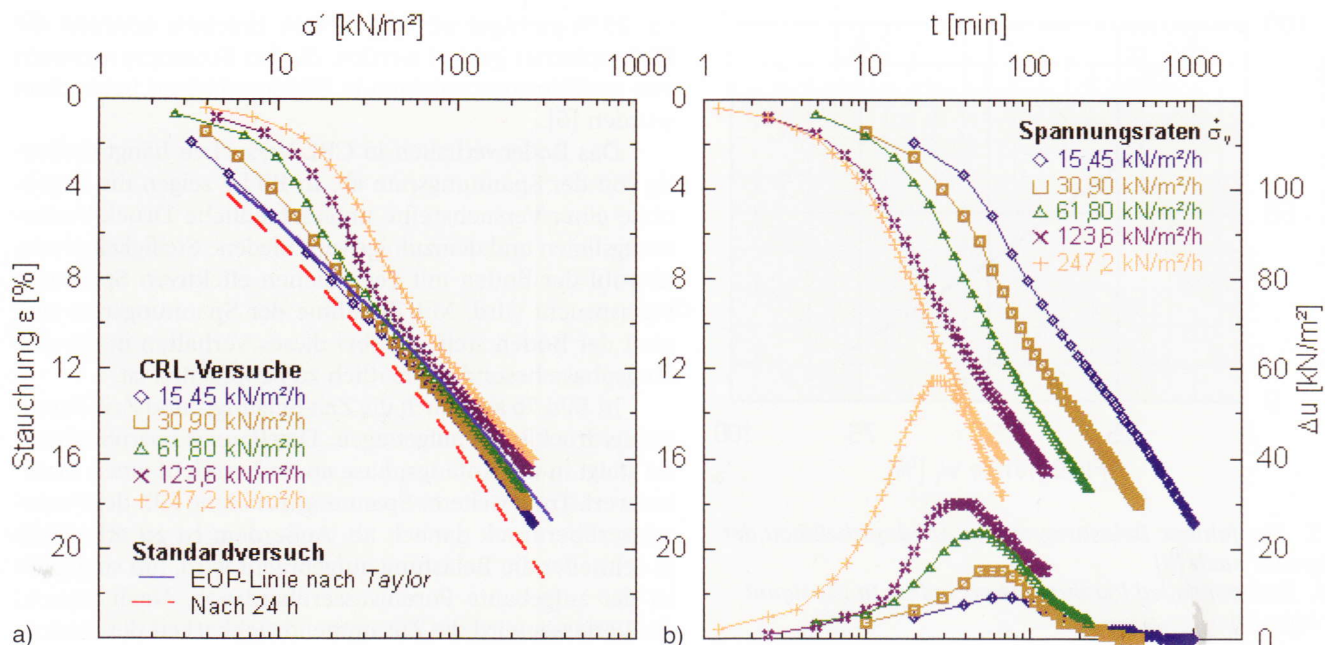


Bild 7. Ergebnisse aus einer CRL-Versuchsreihe und einem Standardkompressionsversuch, a) Druck-Verformungslinien, b) Zeit-Verformungs- und Zeit-Porenwasserüberdrucklinien
 Fig. 7. Results from a CRL-test series and a standard consolidation test, a) stress-strain lines, b) time-strain- and time-excess pore pressure lines

wähnen ist, dass eine Beurteilung des Verformungsverhaltens mit dem Standardkompressionsversuch ohne Berücksichtigung der Lastdauer und des Lastinkrements zu Interpretationsschwierigkeiten führt.

5 Modellvorstellung zum geschwindigkeitsabhängigen Kompressionsverhalten

Aus den Bildern 6 und 7 kann abgeleitet werden, dass zwischen Spannungen und Verformungen kein eindeutiger Zusammenhang hergestellt werden kann, wenn die Zeit der Belastung bzw. die Spannungsrate nicht berücksichtigt wird. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wird auf die Vorgehensweise in [2] zurückgegriffen, wobei die Linien gleicher effektiver Spannungen über die Zeit-Verformungslinien aufgetragen sind, um die Kriechverformungen von den Konsolidationsverformungen zu trennen. Für die in Bild 7b dargestellten Zeit-Verformungslinien wurden die Verformungen bei Berücksichtigung der Porenwasserdruckentwicklungen unter gleichen effektiven Spannungen ermittelt, so dass eine Spannungskurvenschär (Isochronen σ'_i) erhalten und aufgetragen werden kann.

Bild 8 zeigt den Zusammenhang zwischen Zeit, Verformungen und effektiven Spannungen bei monotoner einaxialer Spannungsbeanspruchung. Beim Übergang einer Isochrone von einer Zeit-Setzungslinie zur nächsten erfährt der Boden weitere Verformungen, obwohl er unter gleicher Spannung bleibt. Die zusätzlichen Verformungen sind auf das viskose Verhalten bzw. Kriechen des Bodens während der Konsolidation zurückzuführen, das mit zunehmender Zeit offensichtlicher wird. Des Weiteren kann bei sehr niedrigen Spannungsraten davon ausgegangen werden, dass nur Sekundärkonsolidation bzw. Kriechverformung auftritt, da kein Porenwasserüberdruck mehr entsteht. Insbesondere trifft dieses Verhalten mit Zunahme der Spannungen zu, was in Bild 7b zu erkennen ist. Span-

nungen über z. B. 120 kN/m² verursachen bei den Spannungsraten 30,9 und 15,45 kN/m²/h reine Kriechverformungen bei dem untersuchten Kaolin. Deshalb gehen die Isochronen σ'_i mit Abnahme der Spannungsrate in eine Gerade über, wobei die Neigung dieser Geraden wiederum durch den *Buisman*-Faktor C_B beschrieben werden kann.

Wird das quasi-lineare Kriechverhalten in der Konsolidationsphase angenommen, können die Geraden der reinen Kriechverformungen bis zur Verformungsachse verlängert werden. Der Schnittpunkt einer Geraden mit der ϵ -Achse stellt danach eine „reine“ Konsolidationsverfor-

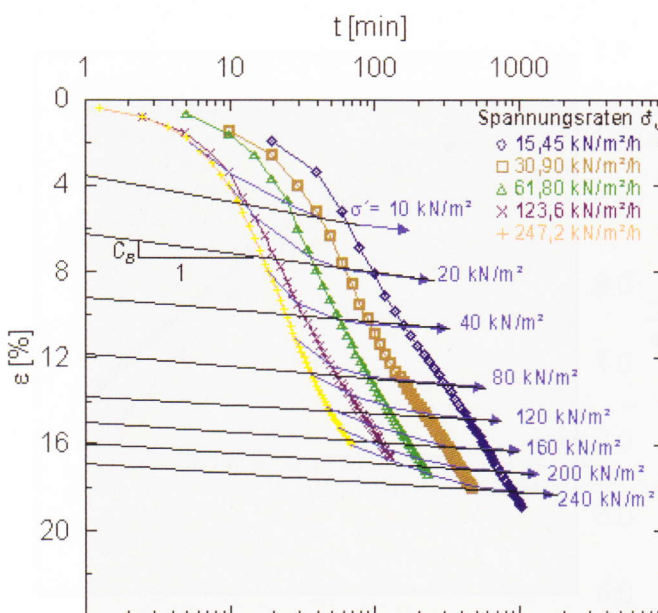


Bild 8. Zusammenhang zwischen Zeit, Verformungen und effektiven Spannungen bei spannungsgesteuerten Versuchen
 Fig. 8. Interrelationship between time, strain and effective stress resulting from CRL-tests

mung für eine Spannungsisochrone dar. Mit den Konsolidationsverformungen und den dazugehörigen effektiven Spannungen kann eine Druck-Konsolidationsverformungslinie ermittelt werden, die nahezu keine Kriechverformungen enthält. Die „pure“ Konsolidationslinie ist mit der Streubreite der CRL-Versuchsergebnisse in Bild 9 dargestellt. Wenn eine Druck-Verformungslinie über der puren Konsolidationslinie liegt, bedeutet dies, dass der Boden

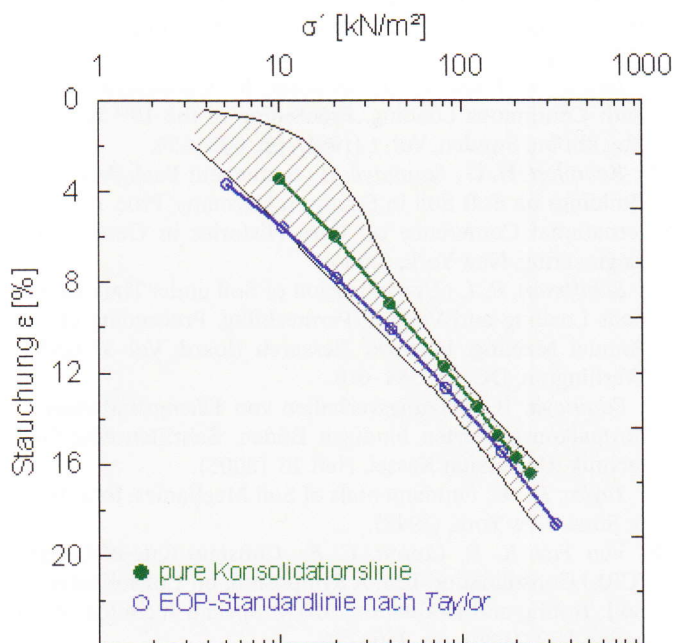


Bild 9. „Pure“ Druck-Konsolidationslinie im Vergleich zu den Standard- und CRL-Linien
 Fig. 9. “Pure” stress-consolidation curve in comparison to the standard and CRL-lines

reine Konsolidationsverformungen aufweist und der entstehende Porenwasserüberdruck hoch genug ist, um nicht nur die Kriechverformungen zu behindern, sondern auch die Gesamtverformungen zu verzögern. Liegt dagegen eine Druck-Verformungslinie unter der puren Konsolidationslinie, wie z. B. die EOP-Standardlinie nach Taylor, weist der Boden zusätzliche Kriechverformungen auf. Damit kann die Druck-Konsolidationslinie als Verformungs-Referenzlinie definiert werden.

Auf der Grundlage der Diskussion der Versuchsergebnisse ist eine Modellvorstellung zum geschwindigkeitsabhängigen Kompressionsverhalten entwickelt worden, wie in Bild 10 gezeigt. Dabei werden die Druck-Verformungslinien unterschiedlicher Spannungsraten (Bild 10a) und die Zeit-Verformungslinien unterschiedlicher Spannungsraten mit den Spannungscurven bzw. den dazugehörigen Isochronen σ'_i (Bild 10b) aufgetragen, wobei die Spannungsrate $\dot{\sigma}_i$ den Scharparameter darstellt.

Wenn der Boden während einer Zeit t_1 bis zu einer bestimmten Spannung σ'_1 unter der Spannungsrate $\dot{\sigma}_2$ belastet wird, verläuft die Druck-Verformungslinie (in Bild 10 gestrichelt) übereinstimmend mit der $\dot{\sigma}_2$ -Linie bis zum Punkt 1 mit der entsprechenden Verformung ε_1 . Nach Erreichung der Spannung σ'_1 verlässt die Druck-Verformungslinie die $\dot{\sigma}_2$ -Linie senkrecht bei konstanter Spannung zu einer anderen $\dot{\sigma}_i$ -Linie je nach Zeitintervall. Nach der Zeit t_2 kreuzt die Verformungslinie z. B. die $\dot{\sigma}_1$ -Linie in Punkt 2 mit der entsprechenden Verformung ε_2 . Es sei angemerkt, dass die gleiche Verformung ε_2 erreicht werden kann, wenn der Boden während der Zeit t_2 bis zu der gleichen Spannung σ'_1 unter der Spannungsrate $\dot{\sigma}_1$ belastet wird.

Entsprechend verläuft die Zeit-Verformungslinie während der Zeit t_1 übereinstimmend mit der $\dot{\sigma}_2$ -Linie bis zum Punkt 1 bzw. zur Isochrone σ'_1 . Danach verläuft die Zeit-

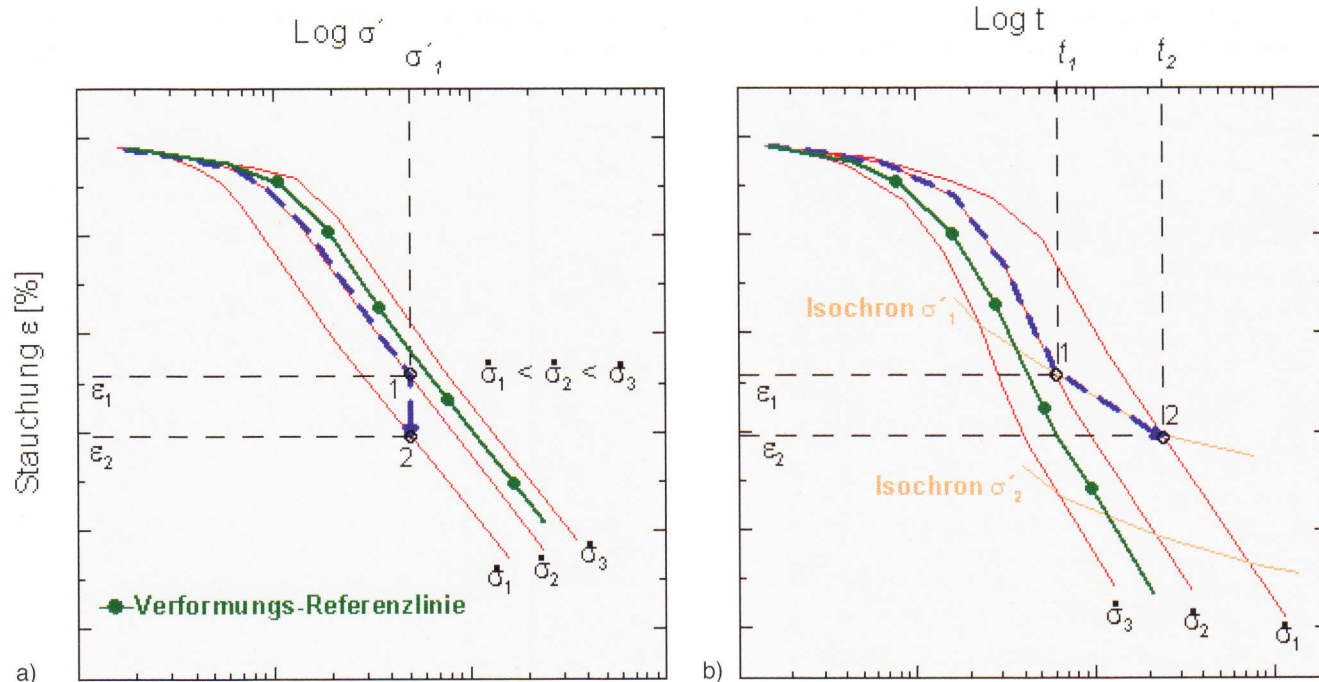


Bild 10. Schematische Modellvorstellung zum geschwindigkeitsabhängigen Kompressionsverhalten, a) Darstellung anhand der Druck-Verformungslinien, b) Darstellung anhand der Zeit-Verformungslinien
 Fig. 10. Schematic illustration of the compressibility behaviour depending on the loading rate, a) presented by means of stress-strain curves, b) presented by means of time-strain curves

Verformungslinie über die Isochrone σ'_2 , und bei einer Zeit t_2 kreuzt die Verformungslinie z. B. die $\dot{\sigma}'_1$ -Linie in Punkt 2 (Bild 10b). Unter gleicher Spannung σ'_1 kann die Verformung beim Punkt 2 erzeugt werden, wenn der Boden während der Zeit t_2 unter der Spannungsrate $\dot{\sigma}'_1$ belastet wird.

6 Zusammenfassung

Als Alternative zu den Standard-Kompressionsversuchen wurden Kompressionsversuche mit konstanter Spannungsrate (CRL-Versuche) im Triaxialgerät unter K_0 -Bedingungen sowie im Oedometer durchgeführt, wobei die Versuchsdauer erheblich reduziert werden kann. Die CRL-Versuche beschreiben das Verformungsverhalten der Böden wirklickeitsnäher, da damit zu den Belastungsrandbedingungen in situ eine Ähnlichkeit vorliegt. Durch die Möglichkeit, beliebige Belastungsraten vorzugeben, ergibt sich eine verbesserte Anpassungsfähigkeit an baupraktische Probleme. Das Bodenverhalten in CRL-Versuchen hängt eindeutig von der Spannungsrate ab. Je schneller der Boden belastet wird, um so größer ist der sich aufbauende Porenwasserüberdruck, wobei in diesem Beitrag Empfehlungen zur „geeigneten“ Belastungsrate angegeben sind.

Bei der Ermittlung der Verformung unter gleichen effektiven Spannungen bei den CRL-Versuchsergebnissen konnte eine Spannungskurvenschar (Isochronen σ'_i) ermittelt werden, die den Zusammenhang zwischen Spannungen, Verformungen und der Belastungszeit bzw. der Spannungsrate herstellt. Damit wurde eine Modellvorstellung zum geschwindigkeitsabhängigen Kompressionsverhalten entwickelt. Unter der Annahme eines quasi-linearen Kriechverhaltens konnten anhand der Spannungskurvenschar bzw. der Isochronen die reinen Konsolidationsverformungen isoliert werden, so dass eine „pure“ Druck-Konsolidationslinie ermittelt wurde, die eine Art Verformungs-Referenzlinie darstellt.

Eine Verifizierung der auf dieser labormäßigen Grundlage ermittelten Steifigkeitsparameter des Bodens und der

damit errechneten Setzungen ergaben sehr gute Übereinstimmung mit zahlreichen Setzungsmessungen an Bauwerken auf weichen Böden [6].

Literatur

- [1] *Aboshi, H., Yoshikuni, A., Mariyama, S.*: Constant Rate Consolidation Test. *Soil and Foundations* 10 (1970), (1), pp. 43–56.
- [2] *Burghignoli*: An experimental study of the structural viscosity of soft clays by means of continuous consolidation test. *Proceeding of the 7th ECSMFE, Brighton, England, Vol. 2* (1979), pp. 23–28.
- [3] *Janbu, N., Tokheim, O., Senneset, K.*: Consolidation Tests with Continuous Loading. *Proceeding of the 10th ICSMFE, Stockholm, Sweden, Vol. 1* (1981), pp. 645–654.
- [4] *Kempfert, H. G., Soumaya, B.*: Settlement Back-Analysis of Buildings on Soft Soil in Southern Germany, *Proc. of 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York*, (2004).
- [5] *Schiffman, R. L.*: Consolidation of Soil under Time Dependent Loading and Varying Permeability. *Proceeding of 37th Annual Meeting, Highway Research Board, Vol. 37* (1958), Washington, DC, pp. 584–618.
- [6] *Soumaya, B.*: Setzungsverhalten von Flachgründungen in normalkonsolidierten bindigen Böden. *Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 16*, (2005).
- [7] *Taylor, D. W.*: *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, (1948).
- [8] *Von Fay, K. F., Cotton, C. E.*: Constant-Rate-of-Loading (CRL) Consolidation Test. *A Symposium on Consolidation of Soil: Testing and Evaluation, ASTM Special Technical Publication 892* (1986), pp. 236–256.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Bassem Soumaya, HOCHTIEF Construction AG, Consult Infrastructure, Alfredstraße 236, 45133 Essen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Fachgebiet Geotechnik, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel