



# DIPLOMARBEIT

Master Thesis

## Vergleich von Kompressionsversuchen mit unterschiedlichen Belastungsarten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
einer Diplom-Ingenieurin/ eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam**

und

**Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Blovsky**

E220

Institut für Geotechnik

Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Jennifer Jörg, BSc**

0840280

Rückertgasse 38/6, 1160 Wien

Wien, im Mai 2016

.....

# Danksagung

Mein Dank gilt jenen Personen, die mich während meines Studiums begleitet und beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben.

Für die Möglichkeit, diese Arbeit am Institut für Geotechnik zu verfassen, bedanke ich mich herzlich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam.

Ein ganz besonderer Dank gilt Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Blovsky für das Thema der Arbeit, sein eingebrachtes Fachwissen und seine hervorragende Betreuung.

Für seine anscheinend ewig anhaltende Geduld möchte ich mich besonders bei Herrn Ing. Andreas Hausenberger bedanken, der zu jeder Zeit für meine Anliegen ein offenes Ohr hatte. Auch bei den Laboranten möchte ich mich herzlich für die tatkräftige Unterstützung bei den im Labor anfallenden Arbeiten bedanken.

Auch bei meinen Freundinnen und Studienkolleginnen möchte ich mich für die gegenseitige Unterstützung bedanken, vor allem für die letzten Monate während des Verfassens dieser Arbeit.

Meiner ganzen Familie danke ich für ihr Vertrauen in mein Können und Unterstützung in allen Belangen.

Mein größter Dank gilt allerdings meiner Freundin Luise Gruber, die mich während meines ganzen Studiums und beim Schreiben dieser Arbeit in jeder Hinsicht unterstützt hat und in allen Situationen stets die richtigen Worte gefunden hat.



# Kurzfassung

Der Kompressionsversuch zur Untersuchung des Verformungsverhaltens von Böden stellt eine der wichtigsten Grundlagen für die Setzungsberechnung von Bauwerken dar. Trotz der raschen Entwicklungen im letzten Jahrhundert, in Bezug auf Gerätetechnik und Datenerfassung, werden Kompressionsversuche bis dato hauptsächlich mit mechanischen Kompressionsgeräten durchgeführt. Auch hat sich die Art der Versuchsdurchführung trotz neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse kaum verändert.

In dieser Arbeit wird vorerst der geschichtliche Hintergrund des Kompressionsversuches beschrieben und der derzeitige Stand der Technik, vor allem im Hinblick auf die derzeitige Geräteausstattung und die unterschiedlichen Versuchsdurchführungen, dargestellt.

Als Grundlage des Kompressionsversuches wird anschließend auf die Theorie der eindimensionalen Konsolidation eingegangen und der im Regelwerk verankerte Standardversuch nach *ÖNORM B 4420* näher beschrieben. Auch das Zeit-Setzungsverhalten, mit welchem die zeitlichen Verformungseigenschaften von Böden beschrieben werden, wird eingehend betrachtet.

In den nachfolgenden Kapiteln werden neben der Klassifikation des Versuchsbodens die Versuchsmethoden bzw. Belastungsarten und die unterschiedlichen Kompressionsgeräte erläutert.

Die Ergebnisse des Spannungs-Verformungsverhaltens der einzelnen Kompressionsversuche werden zunächst innerhalb jeder Versuchsreihe hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit verglichen und anschließend den Erkenntnissen aus weiterführenden Versuchsrandbedingungen gegenübergestellt. Im Falle von Abweichungen werden mögliche Einflussfaktoren beschrieben.

Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den Ergebnissen, Vergleichen und Interpretationen der durchgeführten Kompressionsversuche in einer Zusammenfassung dargestellt.

## Abstract

The consolidation test for investigating the deformation behaviour of soils constitutes one of the main foundations for calculating the settlements of buildings. Despite the rapid development of instrument engineering and data collection in the last century, consolidation tests are mainly conducted with mechanical consolidation apparatus. The procedure for consolidation testing has also not changed, despite new scientific knowledge in its field.

This thesis begins with the historic background of consolidation testing and the current state of the art, with particular regard to present-day consolidation apparatus and the different experimental procedures of consolidation testing.

The theory of one-dimensional consolidation is then being focused on as foundation for consolidation testing, and the standard-incremental-loading (STD) consolidation test – according to the *ÖNORM B 4420* – is described. The time-consolidation behaviour, used for describing the temporal deformation properties of soils, will also be scrutinised.

The chapters to follow illustrate the testing methods, the different loading rates and the different consolidation devices.

The results of the stress-deformation behaviour of the single compression tests are first compared within their respective test series - with regard to their reproducibility - and then with the results in subsequent testing boundary conditions. In cases of deviation, potential influencing factors are described.

Finally, the findings from the results, comparisons, and interpretations of the conducted consolidation tests are outlined in the synopsis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Aufgabenstellung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen.....</b>	<b>2</b>
2.1 Allgemeines.....	2
2.2 Geschichtlicher Hintergrund und Stand der Technik.....	2
2.3 Theorie der eindimensionalen Konsolidation .....	8
2.3.1 Spannung.....	8
2.3.2 Verformung .....	9
2.3.3 Spannungs-Verformungsbeziehung.....	11
2.3.3.1 Steifemodul $E_s$ .....	11
2.3.4 Zusammendrückbarkeit von Böden .....	14
2.3.4.1 Zeit-Zusammendrückungsbeziehung.....	14
2.4 Der Kompressionsversuch nach ÖNORM B 4420 .....	19
2.4.1 Das Kompressionsgerät.....	19
2.4.1.1 Ödometer nach <i>Terzaghi</i> (1925).....	21
2.4.2 Abmessung der Proben .....	22
2.4.3 Probenherstellung.....	23
2.4.4 Versuchsdurchführung.....	23
2.4.5 Auswertung .....	24
2.4.6 Zeit-Zusammendrückungsbeziehung.....	29
<b>3. Laborversuche zum Spannungs-Verformungsverhalten.....</b>	<b>32</b>
3.1 Klassifikation der Bodenproben.....	32
3.1.1 Wassergehalt .....	32
3.1.2 Zustandsgrenzen .....	33
3.1.3 Korngrößenverteilung.....	33
3.1.4 Korndichte .....	34
3.2 Kompressionsversuche - Versuchsmethoden.....	34
3.2.1 Übersicht der durchgeführten Versuche .....	35
3.3 Kompressionsgerät mit mechanischer Lastaufbringung .....	36
3.3.1 Geräteaufbau .....	36
3.3.2 Versuchsdurchführung und Datenerfassung.....	37

3.4	Kompressionsgerät mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung und automatischer Messwerterfassung .....	40
3.4.1	Geräteaufbau .....	40
3.4.2	Versuchsdurchführung und Datenerfassung.....	42
3.4.2.1	Standardversuch nach ÖNORM B 4420 mit stufenweiser Belastung....	43
3.4.2.2	CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittswisen, konstanten Belastungsraten .....	45
3.4.2.3	CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten .....	47
3.4.2.4	CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45kN/m <sup>2</sup> /h.....	48
3.4.2.5	CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5kN/m <sup>2</sup> /h....	50
<b>4.</b>	<b>Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse .....</b>	<b>53</b>
4.1	Vergleich der Ergebnisse in den einzelnen Versuchsreihen .....	53
4.1.1	Standard-Ödometerversuch im mechanischen Kompressionsgerät .....	53
4.1.1.1	Steifemodul .....	53
4.1.1.2	Druck-Verformungslinie .....	55
4.1.2	Standard-Ödometerversuch im vollautomatischen Kompressionsgerät .....	56
4.1.2.1	Steifemodul .....	56
4.1.2.2	Druck-Verformungslinie .....	58
4.1.3	CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittswisen, konstanten Belastungsraten .....	59
4.1.3.1	Steifemodul .....	59
4.1.3.2	Druck-Verformungslinie .....	61
4.1.4	CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten.....	62
4.1.4.1	Steifemodul .....	62
4.1.4.2	Druck-Verformungslinie .....	64
4.1.5	CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45kN/m <sup>2</sup> /h .....	65
4.1.5.1	Steifemodul .....	65
4.1.5.2	Druck-Verformungslinie .....	67
4.1.6	CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5kN/m <sup>2</sup> /h.....	68
4.1.6.1	Steifemodul .....	68
4.1.6.2	Druck-Verformungslinie .....	70
4.1.7	Kompressionsbeiwert C <sub>c</sub> , Schwellbeiwert C <sub>s</sub> .....	71

4.1.8	Zusammenfassung.....	71
4.2	Gegenüberstellung der Vergleichsreihen .....	72
4.2.1	Steifemodul .....	72
4.2.2	Druck- Porenzahlendiagramm .....	75
4.2.3	Kompressionsbeiwert $C_c$ , Schwellbeiwert $C_s$ .....	78
4.3	Zusammenfassung.....	79
4.4	Zeit-Setzungsverhalten der einzelnen Versuchsreihen.....	79
4.4.1	Standard-Ödometerversuch im vollautomatischen Kompressionsgerät .....	80
4.4.1.1	Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung.....	80
4.4.1.2	Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung.....	82
4.4.1.3	Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung aller Laststufen der Erstbelastung nach ÖNORM B 4420 .....	85
4.4.1.4	Zeitlicher Verlauf der Zeit- Setzung aller Laststufen der Wiederbelastung nach ÖNORM B 4420 .....	85
4.4.2	CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittweisen, konstanten Belastungsraten .....	86
4.4.2.1	Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung.....	86
4.4.2.2	Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung.....	88
4.4.3	CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten.....	91
4.4.3.1	Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung.....	91
4.4.3.2	Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung.....	92
4.4.4	CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45kN/m <sup>2</sup> /h .....	93
4.4.4.1	Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung.....	93
4.4.4.2	Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung.....	94
4.4.5	CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5kN/m <sup>2</sup> /h.....	95
4.4.5.1	Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung.....	95
4.4.5.2	Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung.....	96
4.5	Vergleich der Zeit-Setzungslinien der zweiten und dritten Versuchsreihe .....	96
4.5.1	Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung .....	97
4.5.2	Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung .....	99
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b>	<b>102</b>
<b>6.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>104</b>

<b>7. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>107</b>
<b>8. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>112</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>114</b>

# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Um das Setzungsverhalten von Böden beschreiben zu können, werden Kompressionsversuche in Kompressionsgeräten (Ödometern) durchgeführt. Beim Kompressionsversuch handelt es sich um einen Druckversuch mit verhinderter Seitendehnung, wobei die Bodenprobe einem einaxialen Verzerrungszustand unterzogen wird.

Bei Kompressionsversuchen im Labor kommt es bei Bodenproben gleicher Klassifikation immer wieder zu Streuungen der Ergebnisse. Diese betreffen sowohl die daraus resultierenden Steifemoduln, als auch die Zeit-Setzungs-Linie und somit die zeitlichen Verformungseigenschaften von Böden.

Diese Arbeit hat zum Ziel, Kompressionsversuche mit stufenweiser Belastung (IL „incremental loading“) und solche mit monotonen Laststeigerungen (ML „monotonic loading“) zu vergleichen. Hierfür werden sowohl konventionelle mechanisch betätigte Kompressionsstände, als auch elektronisch gesteuerte Prüfgeräte mit automatischer Messwerterfassung herangezogen. Diese Ergebnisse werden ausgewertet und verglichen, um mögliche Einflussfaktoren herauszufinden, welche die Ergebnisse beeinflussen können.

Die Versuche werden an homogenen Proben derselben Bodenart durchgeführt, um mögliche Störungen durch unterschiedliche Bodenproben weitgehend auszuschließen. Bei den verwendeten Bodenproben handelt es sich um miozäne Sedimente des Wiener Beckens („Wiener Tegel“) mit einer überwiegend gleichmäßigen Zusammensetzung und Konsistenz.

Bisherige Kompressionsversuche mit konstanter Laststeigerung wurden vorwiegend in Triaxialgeräten unter Regelung der Seitendehnung und Beobachtung der Porenwasserdrücke durchgeführt [(Aboshi, 1970), (Hamilton und Crawford, 1959), (Hornig, 2011), (Janbu, 2011), (Sällfors, 1976), (Soumaya, 2010), (Steinmann, 1985), (Von Fay, 1986)]. In der vorliegenden Arbeit wird bewusst von dieser Vorgehensweise Abstand genommen, um Ergebnisse in konventionellen Kompressionsgeräten mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung ohne Regelung der Seitendehnung und ohne Aufzeichnung der Porenwasserdrücke zu erhalten.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Allgemeines

Die Zusammendrückbarkeit von Böden wird im Labor in der Regel mit Hilfe von Kompressionsversuchen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Versuche werden im Grund- und Erdbau zur Beschreibung des Setzungsverhaltens von Böden herangezogen. Der Kompressionsversuch ist ein Druckversuch mit verhinderter Seitendehnung, wobei die Probe einem einaxialen Verzerrungszustand unterzogen wird.

Bei diesem Versuch können Belastungen in den unterschiedlichsten Stufen und Belastungsraten auf die Probe aufgebracht werden, um die zahlreichen in der Natur vorkommenden Belastungen so gut wie möglich nachzubilden.

Beim klassischen Ödometerversuch nach *ÖNORM B 4420* wird die Belastung auf die Probe in Stufen aufgebracht, wobei sich die Belastung in jeder Laststufe verdoppelt. Innerhalb jeder Laststufe wird die Zusammendrückung der Probe oder die Porenzahl berechnet und als Funktion der Spannung in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm oder in einem Druck-Porenzahl-Diagramm dargestellt.

### 2.2 Geschichtlicher Hintergrund und Stand der Technik

Schon seit Beginn des 19. Jahrhunderts wurden laut *Hansbo* (1960) Untersuchungen durchgeführt, um qualitative Interpretationen von Setzungen zu erhalten. Den großen Durchbruch und die damit verbundenen neuen Erkenntnisse des Setzungsverhaltens von Böden brachte jedoch erst das im Jahre 1925 erschienene Werk „*Erdbaumechanik*“ von *Terzaghi* (1925), welches die Lösung der eindimensionalen Konsolidationstheorie und die Beschreibung des Ödometerversuches enthielt. Das Werk von *Terzaghi* (1925) bildet bis heute die Basis der modernen Bodenmechanik.

Beim Ödometerversuch nach *Terzaghi* (1925) wird die Last in inkrementellen Stufen (IL-Incremental Loading) von durchschnittlich 24 Stunden aufgebracht. Dies hat den Nachteil, dass Kompressionsversuche dieser Art deutlich länger dauern als die weiterentwickelten Versuche mit elektrisch gesteuerter monotoner Lastaufbringung (ML-Monotonic Loading). Trotzdem wird seit Jahrzehnten fast ausschließlich der Standardversuch im Ödometergerät für das Verformungsverhalten von bindigen Böden eingesetzt. Dieser Versuch wurde auch in den nationalen und internationalen Normen aufgenommen und geregelt. Auch die Tatsache, dass es noch kein Regelwerk für ML-Versuche gibt, trägt dazu bei, dass diese Art von Versuchen in der Praxis noch kaum zur Anwendung kommt.



In den nachstehenden Diagrammen wird der Unterschied zwischen IL-Versuchen und ML-Versuchen dargestellt:

### IL-Versuche

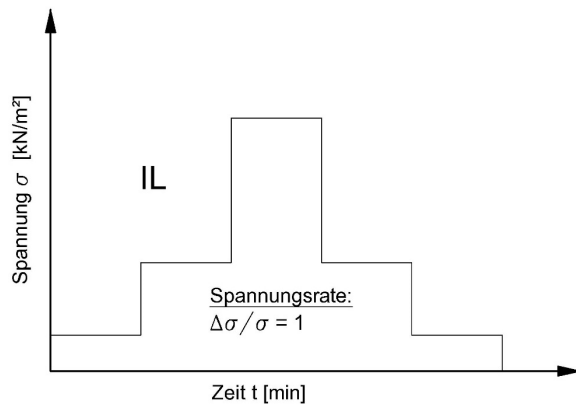


Abbildung 1: Diagramm eines IL-Versuches

### ML-Versuche

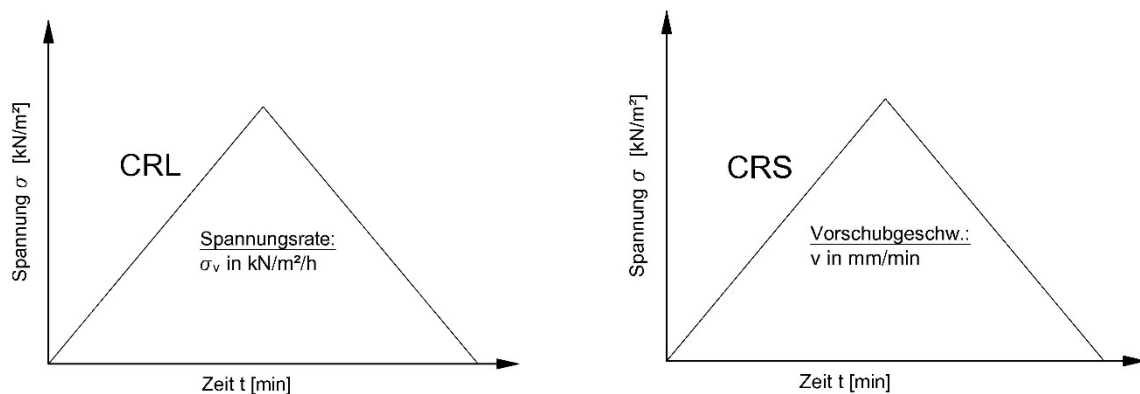


Abbildung 2: Links: ML-Versuch mit konstanter Spannungsrate (CRL); Rechts: ML-Versuch mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit (CRS)

Nach den bedeutenden Erkenntnissen von *Terzaghi* (1925) herrschte auf dem Gebiet der experimentellen Untersuchung des eindimensionalen Verhaltens von Böden lange Zeit Stillstand in der Weiterentwicklung.



Abbildung 3: Links: vollautomatische Kompressionsgeräte; Rechts: Ödometer nach Terzaghi im Erdbaulaboratorim der TU Wien

Erst durch die rasche Entwicklung auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung und Weiterentwicklung der Speichermedien kam es zu einer automatisierten Messwerterfassung der Kompressionsversuche. Auch kam auf Grund der Nachteile des Ödometersversuches nach *Terzaghi* (1925), welcher eine lange Versuchsdauer, und bei unregelmäßigen Lastintervallen eine Unsicherheit der Druck-Setzungslinie aufwies, die Idee auf, Versuche mit monoton zunehmender Beanspruchung zu entwickeln. Bei Versuchen mit monoton zunehmender Belastung kann bei entsprechender Berücksichtigung der laufend aufgezeichneten Verformungsraten eine deutlich kürzere Versuchsdauer erzielt werden. Auf Grund der Entwicklung der Geräte kann das Verformungsverhalten von weichen Böden durch die konstante Zunahme der Belastung bei ML-Versuchen wirklichkeitsnäher nachgebildet werden.

Erste Entwicklungen der neuen Versuche begannen schon 1953, jedoch noch unter den üblichen Randbedingungen und den damit verbundenen Nachteilen. Ende der 1950er Jahre wurden erste Abweichungen zum üblichen Versuch mit inkrementellen Belastungsstufen untersucht, dies jedoch ohne Berücksichtigung der Porenwasserüberdrücke, sodass Aussagen über effektive Spannungen in Frage gestellt wurden.

Ein weiterer Grund für die Einführung neuer Ödometersversuche war das Bestreben, die Vorbelastungsspannung eines bindigen Bodens besser erfassen zu können. *Hamilton* und *Crawford* (1959) führten dazu erstmals Versuche mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit (CRS-Constant Rate of Strain) durch und stellten durch Vergleichsversuche mit konstanter Spannungsgeschwindigkeit (CRL-Constant Rate of Loading) fest, dass Versuche mit

konstanter Vorschubgeschwindigkeit die Vorbelastungsspannung eines bindigen Bodens am besten nachbildeten. Versuche mit konstanter Spannungsgeschwindigkeit schienen dafür nicht geeignet.

In den Jahren 1969 bis 1971 erfolgte der Durchbruch der CRS-Versuche als gleichwertiger Ödometerversuch neben dem IL-Versuch durch die Arbeiten von *Smith* und *Wahls* (1969) sowie von *Wissa* (1971). Diese stellten eine verbesserte Versuchstechnik vor und lieferten auch die fehlenden theoretischen Hintergründe dieses Versuches.

Im Jahre 1970 kamen durch die Untersuchungen von *Aboshi* (1979) nochmals die CRL-Versuche, welche von *Hamilton* und *Crawford* (1959) als nicht geeignet befunden wurden, zur Diskussion. Die Versuche von *Aboshi* (1979) zeigten jedoch, dass CRL-Versuche die geringsten Abweichungen zu den IL-Versuchen aufwiesen.

Da in den bislang veröffentlichten Versuchen lediglich neu entwickelte Methoden des Ödometerversuches mit IL-Versuchen verglichen wurden, jedoch nie mit unterschiedlichen ML-Versuchen, wurden in den Jahren 1975 bis 1976 ausführliche Vergleichsuntersuchungen durch *Sällfors* (1976) und *Gorman* (1976) durchgeführt. Beide kamen zu dem Ergebnis, dass CRS-Versuche die besten Voraussetzungen erfüllen, den IL-Versuch abzulösen.

Als nächste Neuentwicklung bei den ML-Versuchen kam der CL-Versuch (CL-Continuous Loading), welcher von *Janbu* (1981) vorgestellt wurde. Dieser hatte als Randbedingungen das konstante Verhältnis von Porenwasserüberdruck an der Basis zu Oberflächenspannung als Grundlage. Ein Resultat seiner Arbeit war, dass es möglich ist, die Versuchsdauer möglichst kurz zu halten, und dass dadurch höhere Porenwasserüberdrücke zugelassen werden können. Dies erwähnte *Janbu* (1981) im Gegensatz zu den früheren Autoren erstmalig.

*Steinmann* (1985) untersuchte die Eignung unterschiedlicher ML-Versuchstypen für Routineanwendungen. Er führte seine Versuche, wie auch seine Vorgänger, mit Porenwasserdruckmessungen durch und verglich diese mit den Ergebnissen von Standard-Ödometerversuchen. *Steinmann* (1985) kam, wie schon zuvor *Hamilton* (1959), zur Erkenntnis, dass der CRS-Versuch mit vorgegebenen Verschiebungsfunktionen am oberen Probenrand die beste Alternative zu den Standardversuchen darstellte.

Fast zeitgleich führte *Von Fay* (1986) CRL-Versuche mit unterschiedlichen Belastungsraten durch und verglich deren Ergebnisse mit Standardversuchen. Auch er führte die CRL-Versuche unter Berücksichtigung der Porenwasserdrücke in einem Art Triaxialgerät unter  $K_0$ -Bedingungen durch. Da die gewählte Belastungsrate eine entscheidende Rolle bei CRL-Versuchen darstellt, war das Ziel seiner Untersuchungen, Richtwerte für Belastungsraten in Abhängigkeit der Fließgrenze eines Bodens herauszufinden. Das von ihm erstellte

Diagramm wird heute noch als Richtwert für die Belastungsraten bei bindigen Böden herangezogen.

*Soumaya* (2010) stellte zu den von *Von Fay* (1986) erbrachten Ergebnissen die mathematischen Grundlagen auf, mit welchen Unsicherheiten bei der Durchführung der CRL-Versuche und deren Interpretation beseitigt wurden. Auch er führte seine Versuche im Triaxialgerät unter  $K_0$ -Bedingungen durch. Durch zahlreiche CRL-Versuche unter gleichen effektiven Spannungen konnte *Soumaya* (2010) eine Spannungskurvenschär ermitteln, welche den Zusammenhang zwischen Spannung, Verformung und der Belastungsrate herstellt. Die Ergebnisse aus seinen Versuchen ergaben sehr gute Übereinstimmungen mit Setzungsmessungen an Bauwerken gleicher Bodenbeschaffenheit.

In den letzten Jahren wurden durch den Fortschritt der Labortechnik Kompressionsgeräte mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung und automatischer Messwerterfassung auf den Markt gebracht. Somit können nicht nur Triaxialgeräte für ML-Versuche herangezogen werden. Mit automatischen Kompressionsgeräten ist es möglich, alle Arten von ML-Versuchen und IL-Versuchen vollautomatisch durchführen zu lassen, wobei gleichzeitig eine automatische Datenerfassung stattfindet. Sämtliche Parameter können im Vorhinein individuell festgelegt und programmiert werden. Vorteil dieser Geräte ist die individuelle Anpassungsfähigkeit der Versuche und deren vollautomatische Durchführung. Nachteilig ist der vergleichsweise hohe Aufwand für die Programmierung von Prüfvorschriften für die Plausibilitätsprüfung von Versuchsserien unterschiedlicher Bodenarten, sowie die Abhängigkeit von unterbrechungsfreier Datenaufzeichnung und Stromversorgung.



*Abbildung 4: Kompressionsgerät mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung und automatischer Messwerterfassung der Fa. WILLE*

Bei diesen vollautomatischen Kompressionsgeräten besteht zusätzlich die Möglichkeit,  $K_0$ -Ödometerzellen zu verwenden und somit den Seitendruck zusätzlich aufzuzeichnen. Auch unter Verwendung der  $K_0$ -Zelle können alle Steuer- und Messparameter festgelegt und programmiert werden.

Wie bereits erwähnt, werden Kompressionsversuche zur Bestimmung der Zusammendrückung von Böden in der Praxis häufig mit einem Triaxialgerät durchgeführt. Mit einem Triaxialgerät können Standardversuche sowie alle Arten von ML-Versuchen durchgeführt werden. In diesem Gerät werden Kompressionsversuche unter Ruhedruckbedingungen ( $K_0$ ) durchgeführt, womit die Steifemoduln und die Zeit-Setzung von Böden bestimmt werden können. Auch bei diesem Gerät können alle Parameter festgelegt und programmiert werden. Die Durchführung und Aufzeichnung dieser Versuche verläuft vollautomatisch.

Vorteile dieses Versuches sind die Minimierung der Einbaustörungen, die Möglichkeit einen um ein vielfaches größeren Probenkörper zu untersuchen und das Überwachen des Porenwasserdruckes über die gesamte Versuchsdauer. So kann ausgeschlossen werden, dass die Belastungsrate einerseits zu hoch ist und so ein Porenwasserüberdruck entsteht, und andererseits, dass die Belastungsrate zu niedrig ist und der Porenwasserdruck so gering ist, dass er nicht mehr aufgezeichnet werden kann.



Abbildung 5: Vollautomatisches Triaxialgerät der Fa. WILLE

## 2.3 Theorie der eindimensionalen Konsolidation

### 2.3.1 Spannung

Erfährt ein Boden eine Belastungsänderung, so tritt gleichzeitig auch eine Formänderung des Bodens auf. Da ein Boden im feuchten Zustand ein Dreiphasensystem aus Feststoff, Porenvolumen und Porenwasser bildet, wirkt sich jede Belastungsänderung auf alle drei Bestandteile aus, wobei ein Großteil der Verformung durch die Änderung des Porenvolumens hervorgerufen wird. Ist ein Boden zusätzlich wassergesättigt, verringert sich durch die Belastung nicht nur das Porenvolumen, sondern im offenen System auch der Wassergehalt.

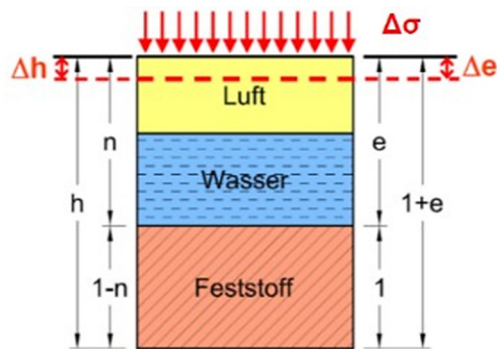


Abbildung 6: Dreiphasensystem des Bodens unter Aufbringung einer Flächenlast (Adam, 2016)

Die durch die äußere Belastung auftretenden inneren Spannungen stehen zu jeder Zeit im Gleichgewicht mit der äußeren Spannung. Wird die Spannung als  $\sigma$  bezeichnet und der Anteil der auftretenden Reaktionsspannungen, welche auf das Korngerüst entfallen als  $\sigma'$  und der Anteil welcher auf das Porenwasser entfällt als  $u$ , so gilt:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.1)$$

Spannungen, welche auf das Korngerüst wirken, werden als effektive Spannungen bezeichnet und solche, welche auf das Porenwasser wirken, als neutrale Spannungen.

Bei Kompressionsversuchen mit verhinderter Seitendehnung, welche zur Ermittlung des Steifemoduls herangezogen werden, tritt folgender Spannungszustand auf:

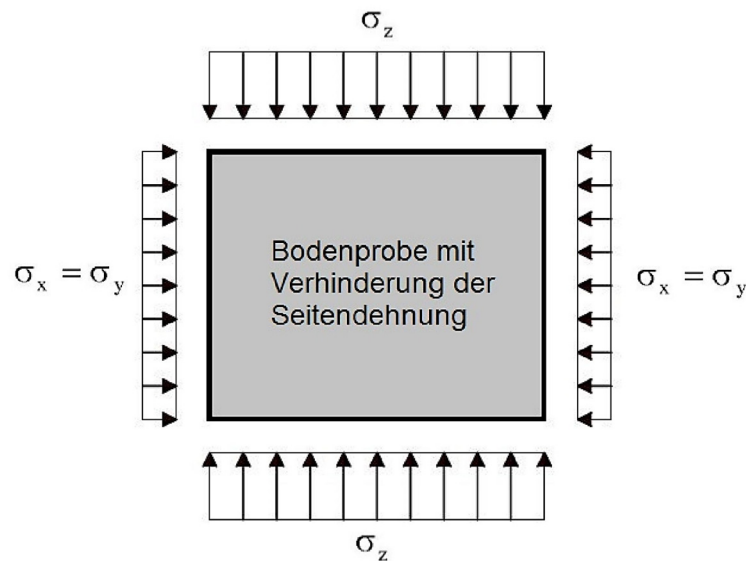


Abbildung 7: Spannungszustand bei Kompressionsversuchen mit verhinderter Seitendehnung

### 2.3.2 Verformung

Durch einen äußeren Spannungszustand auf eine Bodenprobe wird eine Verformung hervorgerufen, welche abhängig von der Bodenzusammensetzung, vom Spannungszustand, von der Zeit und von den äußeren gegebenen Randbedingungen durch die eingesetzten Versuchsgeräte ist. Durch die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Spannung und Verformung werden allgemein idealisiert die Ansätze der Elastizitätstheorie zur Berechnung der Verformungen von Böden herangezogen. Die elastischen Grundgleichungen für den allgemeinen räumlichen Spannungszustand ergeben die Verformungsgleichungen für die drei Richtungen  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (2.4)$$

Diese werden häufig als Erweiterung des *Hooke'schen* Gesetzes bezeichnet, wobei mit  $\nu$  die *Poisson-Zahl* (Querkontraktionszahl) bezeichnet wird, welche sich bei einer Belastung in  $z$ -Richtung für ein isotropes Material zu:

$$\nu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \quad (2.5)$$

ergibt. Für die betrachtete einaxiale Verformung, bei welcher die Belastung und Zusammendrückung in z-Richtung auftritt, da eine Verformung in x- und y-Richtung verhindert ist, lautet die Verformungsgleichung:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_s}, \quad (2.6)$$

wobei  $E_s$  als Steifemodul bezeichnet wird, der den maßgebenden Kennwert der Zusammendrückung mit verhinderter Seitendehnung darstellt. Er ist folgendermaßen mit dem Elastizitätsmodul verbunden:

$$E_s = \frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2} E \quad (2.7)$$

Beim Ödometerversuch mit festem Ring treten die größten Verformungen  $\Delta h$  am oberen Probenrand auf. Die daraus resultierende Zusammendrückung wird als Setzung  $s$ , oder wenn sie auf die Ausgangshöhe  $h_0$  bezogen wird, als Stauchung  $\varepsilon_z$  angegeben:

$$\varepsilon_z = \frac{s}{h_0} \quad (2.8)$$

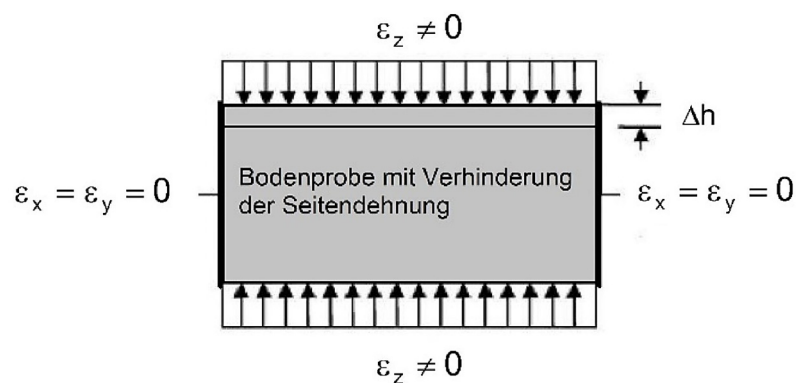


Abbildung 8: Verformung im Standard-Ödometerversuch



### 2.3.3 Spannungs-Verformungsbeziehung

Auf Grund des Umstandes, dass beim Kompressionsversuch mit verhinderter Seitendehnung Stauchungen/Dehnungen lediglich in z-Richtung auftreten, wird in den folgenden Kapiteln auf den Index z verzichtet.

Wie schon erwähnt, wird in Kompressionsgeräten mit verhinderter Seitendehnung das Verformungsverhalten von Böden zur Beschreibung der eindimensionalen Zusammendrückung bestimmt. Der durch den Versuch hervorgerufene Spannungs- und Verformungszustand gilt für unendlich ausgedehnte, homogene Bodenschichten unter konstanter Auflast in der Natur. Dieser Spannungs- und Verformungszustand wird für das Setzungsverhalten von Böden unter Halbraumbedingungen angesehen.

#### 2.3.3.1 Steifemodul $E_s$

Mit den durch den Kompressionsversuch erhaltenen Setzungen  $s$  werden zunächst die Dehnungen  $\varepsilon$  in Bezug auf die ursprüngliche Probenhöhe  $h_0$  berechnet:

$$\varepsilon = \frac{s}{h_0} \quad (2.9)$$

Damit kann ein Zeit-Setzungsdiagramm gezeichnet werden, wobei die Asymptoten an der Zeitsetzungskurve die Endsetzung ergeben.

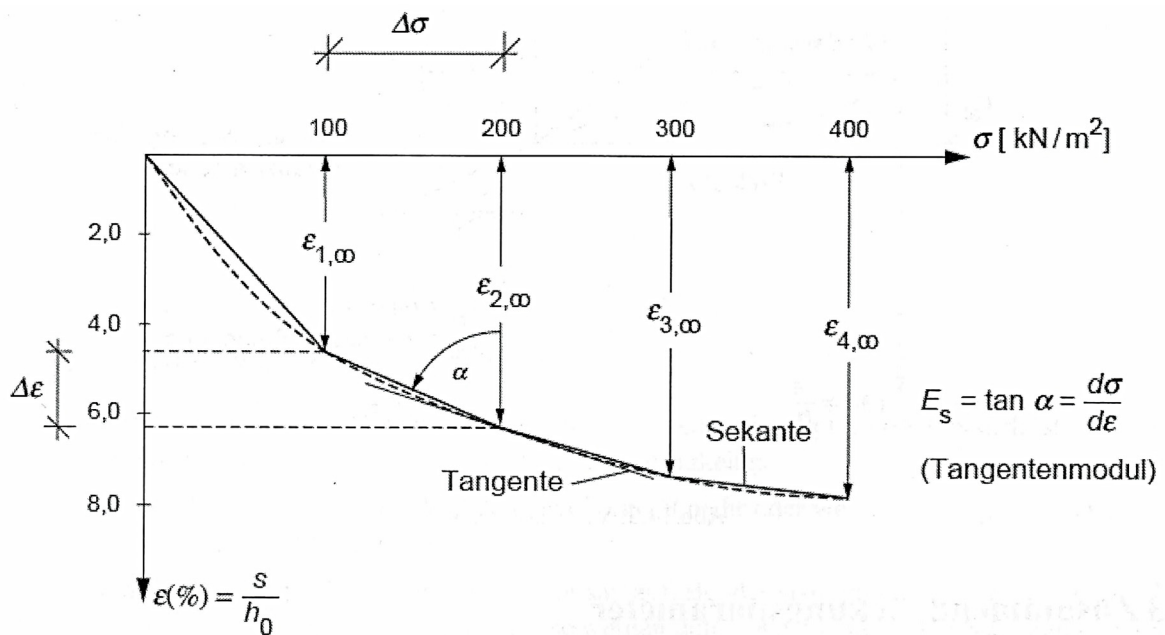


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm zur Definition des Steifemoduls

Aus dem oben abgebildeten Spannungs-Dehnungs-Diagramm kann der Steifemodul  $E_s$  als Tangentenmodul:

$$E_s = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.10)$$

oder als Sekantenmodul:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.11)$$

bestimmt werden.

Es ist gut erkennbar, dass sich mit steigender Spannung die Kurve verflacht und somit der Steifemodul  $E_s$  größer wird und sich die Bodenprobe verfestigt. Auf Grund der Spannungsabhängigkeit des Steifemoduls werden häufig auch weiterführende abgeleitete Kennwerte für die Berechnung der Setzung ermittelt. Dies erfolgt mittels Kompressionsbeiwert  $C_c$ , Rekompansionsbeiwert  $C_r$  und Schwellindex  $C_s$  aus dem Druck-Porenzahl-Diagramm.

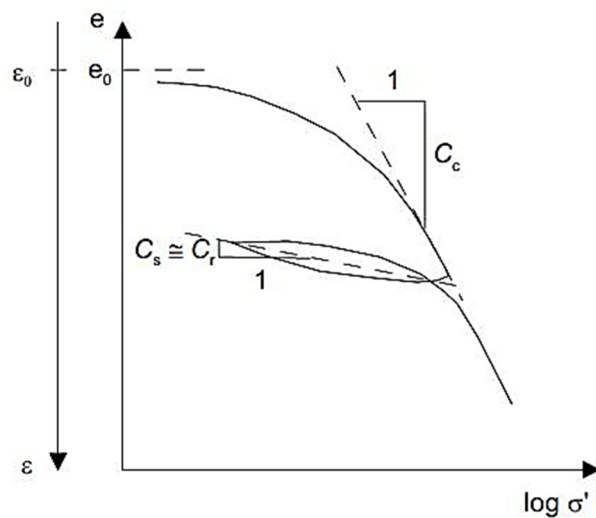


Abbildung 10: Ermittlung der Verformungsbeiwerte im Druck-Porenzahl-Diagramm  
(Soumaya, 2005)

Die Steigung des geradlinigen Bereiches des Druck-Porenzahl-Diagramms gibt den Kompressionsbeiwert  $C_c$  an (ÖNORM B 4420):

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \quad (2.12)$$

Der Rekompansionsbeiwert  $C_r$  und der Schwellindex  $C_s$  werden durch die gemeinsame Neigung der Ent- und Wiederbelastungssekante beschrieben. Der Schwellindex  $C_s$  wird gemäß ÖNORM B 4420 im Unterschied zu obiger Definition am zweiten Entlastungsast im Druck-Porenzahl-Diagramm ermittelt.

Der Kompressionsbeiwert wird häufig durch die Korrelation zwischen der Zusammendrückbarkeit und den klassifizierenden Bodenkenngrößen beschrieben. Für normalkonsolidierte Böden kann folgende Formel zur Ermittlung des Kompressionsbeiwertes in Abhängigkeit der Fließgrenze  $w_L$  angewendet werden (ÖNORM B 4420):

$$C_c = 0,009 \cdot (w_L - 10) \quad (2.13)$$

Durch nachstehende Tabelle kann die Zusammendrückbarkeit von Böden nach dem Kompressionsbeiwert  $C_c$  abgeschätzt werden.

Zusammendrückbarkeit des Bodens	Kompressionsbeiwert
leicht	$C_c < 0,2$
mäßig	$C_c = 0,2 \text{ bis } 0,4$
stark	$C_c > 0,4$

Tabelle 1: Kompressionsbeiwerte  $C_c$  von bindigen Böden

Durch die Beziehung der oben angeführten Gleichungen kann der Steifemodul für die Erst- und Wiederbelastung aus folgenden Gleichungen errechnet werden (ÖNORM B 4420):

für die Erstbelastung:

$$E_{s,E} = \frac{\sigma'(1+e)}{C_c} \quad (2.14)$$

und für die Wiederbelastung:

$$E_{s,W} = \frac{\sigma'(1+e)}{C_r} \quad (2.15)$$

## 2.3.4 Zusammendrückbarkeit von Böden

### 2.3.4.1 Zeit-Zusammendrückungsbeziehung

Beim Standard-Ödometerversuch nach *Terzaghi* (1925), sowie bei allen restlichen IL-Versuchen, wird die Setzung in jeder Laststufe abgewartet, messtechnisch verfolgt und als Funktion der Zeit  $t$  dargestellt. Aus der daraus resultierenden Zeit-Setzungskurve lassen sich bei bindigen Böden unterschiedliche Anteile der Setzung ableiten.

- Direkt mit dem Aufbringen der Belastung tritt die **Sofortsetzung** auf. Diese ist auf das seitliche Abweichen des Bodens und auf die Kompression der im Boden befindlichen Luft zurückzuführen.
- Darauf folgt die **Primärsetzung**, welche durch die Konsolidation hervorgerufen wird. Durch das Aufbringen der Last wird bei bindigen Böden Porenwasser aus der Probe herausgedrückt, was je nach Zusammensetzung des Bodens einige Zeit in

Anspruch nehmen kann. Dieser Vorgang wird als Konsolidationssetzung bezeichnet und ist nach Abklingen des Porenwasserüberdruckes beendet.

- Nach Ende der Konsolidationsphase setzt bei konstant bleibender Belastung die **Sekundärsetzung** ein. Dieser Vorgang wird üblicherweise auch als Kriechen bezeichnet, welches theoretisch kein Ende aufweist. Die Sekundärsetzung verlangsamt sich jedoch logarithmisch, das heißt, dass im Zeitraum von 10 bis 100 Minuten der gleiche Setzungszuwachs auftritt wie zwischen 10 und 100 Jahren.

Die Grundlagen zur Berechnung der Setzungsgrößen liefern die eindimensionalen Elastizitätsgleichungen basierend auf *Hook* unter Annahme der Spannungsverteilung im Halbraum.

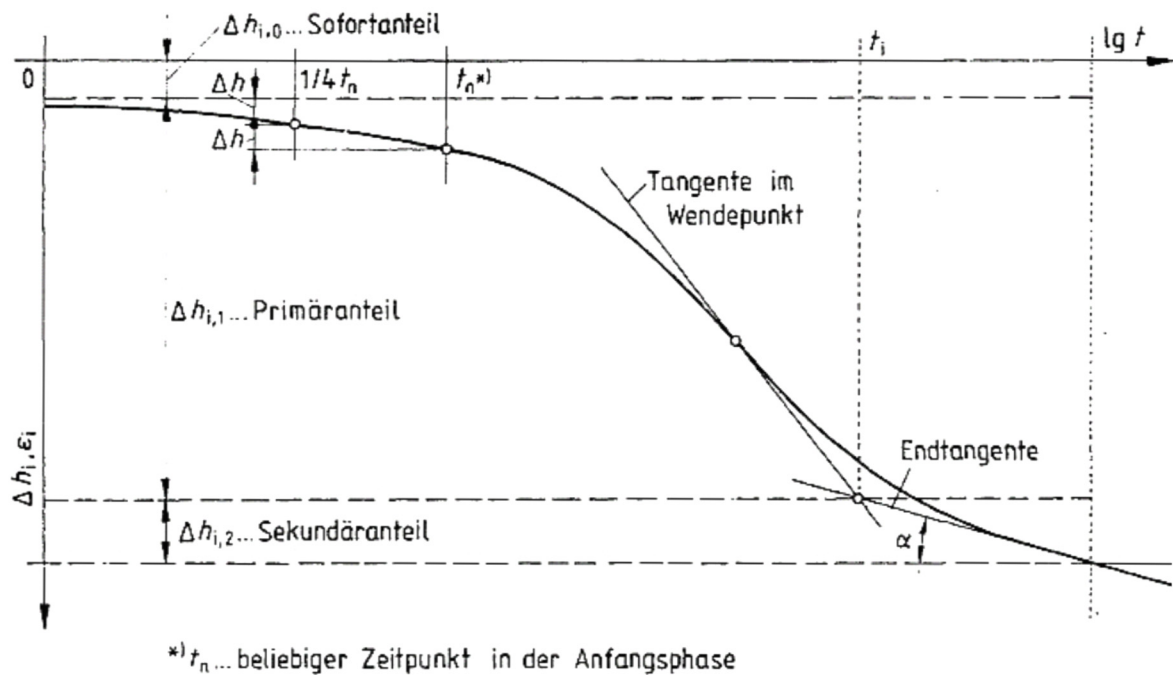


Abbildung 11: Anteile der Zeit-Setzungskurve an der Gesamtsetzung (ÖNORM B 4420)

Terzaghi (1925) veröffentlichte die eindimensionale Konsolidationstheorie, welche den zeitlichen Verlauf des Konsolidationsprozesses näher zu beschreiben ermöglicht. Der eindimensionale Konsolidierungszustand liegt dann vor, wenn die Porenwasserströmung, welche infolge einer Belastungsänderung auftritt, nur in eine Richtung auftritt und der Boden nur in diese Richtung Verformungen erfährt. Dieser Zustand wird beim Ödometerversuch mit verhinderter Seitendehnung erreicht.

Unter der Annahme, dass die Volumenänderung des Bodens bei Belastungsänderungen gleich der ausgetretenen Wassermenge ist, wird davon ausgegangen, dass die

Zusatzspannungen zum Zeitpunkt der Lastaufbringung vollständig in einen Porenwasserüberdruck übergeleitet werden.

Wie schon beschrieben kommt es durch eine Belastungsänderung in den wassergesättigten Bodenschichten zum Aufbau eines Porenwasserüberdruckes. Die effektive Spannung vor Aufbringen der Auflast beträgt:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u_0 \quad (2.16)$$

Nach Aufbringen der Belastung  $\sigma$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  steigt der Porenwasserdruck um den Betrag  $\Delta u = \sigma$  an.

Es gilt, dass zu jedem Zeitpunkt  $t$  die Summe aus der Vergrößerung der effektiven Spannungen und des Zusatzporenwasserdrucks gleich dem Konsolidationsdruck sein muss:

$$\Delta\sigma' - \Delta u = \sigma \quad (2.17)$$

$$\Delta u = \sigma - \Delta\sigma' \quad (2.18)$$

Durch die konstante Zusatzbelastung je Zeit erfolgt eine Abnahme des Zusatzporenwasserdrucks  $\Delta u$  zu:

$$\frac{\partial\Delta u}{\partial t} = -\frac{\partial\Delta\sigma'}{\partial t} \quad (2.19)$$

Durch das *Hooke'sche* Gesetz kann die Zusammendrückung infolge der Zunahme der effektiven Spannungen um  $\Delta\sigma'$  berechnet werden:

$$\Delta s = \frac{1}{E_s} \Delta\sigma' \quad (2.20)$$

Die Porenwasserströmung infolge Belastung erfolgt nach dem *Darcy'schen* Gesetz:

$$v = k_f \cdot i \quad (2.21)$$

mit dem hydraulischen Gradienten:

$$i = -\frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{1}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial\Delta u}{\partial z} \quad (2.22)$$

und der Filtergeschwindigkeit:

$$v = -\frac{k_f}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial z} \quad (2.23)$$

Unter der beschriebenen Annahme, dass die Volumenänderung des Bodens bei Belastungsänderungen gleich der ausgetrönten Wassermenge ist, fließt durch eine Flächeneinheit ( $A=1$ ) pro Zeiteinheit folgende Wassermenge durch:

$$q = v \cdot A = -\frac{k_f}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial z} \cdot 1 \quad (2.24)$$

und folglich durch eine Ebene, die um  $dz$  höher liegt:

$$q + dq = -\frac{k_f}{\gamma_w} \cdot \left( \frac{\partial \Delta u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial z} \cdot dz \right) \quad (2.25)$$

Die aus einer Einheit des Rauminhalts ausgepresste Wassermenge beträgt nun:

$$\frac{dq}{dz} = -\frac{k_f}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \quad (2.26)$$

Aus oben genannten Gleichungen folgt somit die Differentialgleichung des eindimensionalen Konsolidationsvorganges nach *Terzaghi* (1925) zu:

$$\frac{\partial \Delta u}{\partial t} = \frac{k_f \cdot E_s}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \quad (2.27)$$

oder

$$\frac{\partial \Delta u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \quad (2.28)$$

mit dem Konsolidations- oder Verfestigungsbeiwert:

$$c_v = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w} \quad (2.29)$$

Durch die Einführung des Verfestigungs- und Konsolidationsgrades  $U_c$ , wurde die Differentialgleichung des eindimensionalen Konsolidierungsvorganges erweitert, um damit baupraktische Berechnungen des Setzungs Vorganges vornehmen zu können:

$$U_c = \frac{\Delta u_i - \Delta u}{\Delta u_i} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta u_i} \quad (2.30)$$

Jedoch ist in den meisten Fällen nur der mittlere Konsolidierungsgrad  $U_m$  interessant:

$$U_m = \frac{s_t}{s_{t=\infty}}, \quad (2.31)$$

wobei  $s_{t=\infty}$  die Konsolidationsgesamtsetzung beschreibt.

Für verschiedene Randbedingungen wird der Konsolidationsgrad durch den Konsolidationsbeiwert  $c_v$  in Abhängigkeit vom Zeitfaktor oder der bezogenen Konsolidierungszeit  $T_v$  errechnet:

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{l_d^2} \quad (2.32)$$

$$c_v = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w} \quad (2.33)$$

Der Drainageweg wird mit  $l_d$  und der Durchlässigkeitsbeiwert mit  $k$  beschrieben.

Um mit oben angeführten Formeln die Konsolidierungszeit zu berechnen, müssen folgende Randbedingungen für eine einseitig drainierte Schicht definiert werden. (*Adam, 2010*):

- für  $t = 0$  ist  $\Delta u = \Delta \sigma$ , unabhängig von der Tiefe  $z$ ;
- bei  $t = \infty$  ist der Porenwasserüberdruck  $\Delta u$ , unabhängig von der Tiefe  $z$ ;
- für jeden Zeitpunkt ist an der Oberfläche der Porenwasserüberdruck  $\Delta u = 0$ , da das abgepresste Wasser sofort abfließen kann;
- für jeden Zeitpunkt ist an der undurchlässigen Grenzschicht  $z = 0$  die Filtergeschwindigkeit nach Darcy  $v = 0$ .



## 2.4 Der Kompressionsversuch nach ÖNORM B 4420

In der ÖNORM B 4420 wird der Kompressionsversuch folgendermaßen beschrieben:

*„Kompressionsversuch: einaxialer Druckversuch mit stufenweiser Aufbringung einer Last und anschließender, zumeist ebenfalls stufenweiser Entlastung, wobei die seitliche Ausdehnung (Querdehnung) der Bodenprobe durch das Versuchsgerät verhindert wird.“*  
(ÖNORM B 4420, 1989, S. 2)

### 2.4.1 Das Kompressionsgerät

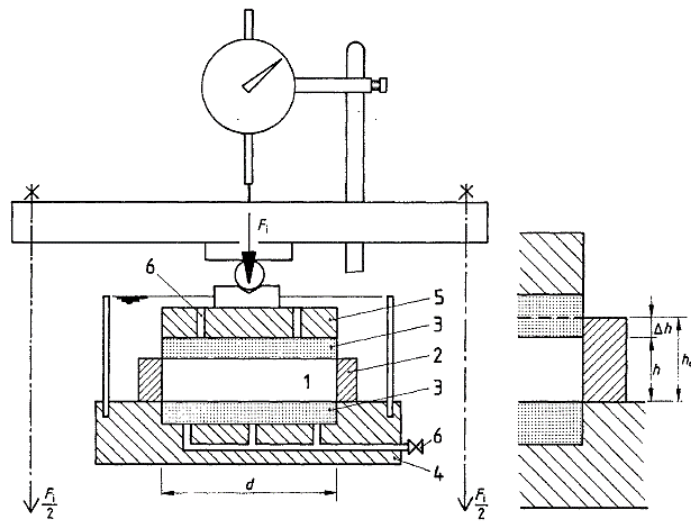
Das einfachste Gerät, mit welchem Kompressionsversuche durchgeführt werden nennt sich Kompressionsgerät. Hauptstück dieses Gerätes ist der Probeneinspannring, welcher die Bodenprobe aufnimmt. Dies kann mit oder ohne Ausstechring erfolgen. Der Ausstechring verhindert während der Versuchsdurchführung eine Querdehnung der Bodenprobe.

Oben und unten ist die Bodenprobe von Filterplatten begrenzt, welche ein Zu- und Abströmen von Porenwasser ermöglichen. Die Belastung der Bodenprobe erfolgt über die obere Filterplatte.

Grundsätzlich werden zwei Arten von Kompressionsgeräten unterschieden:

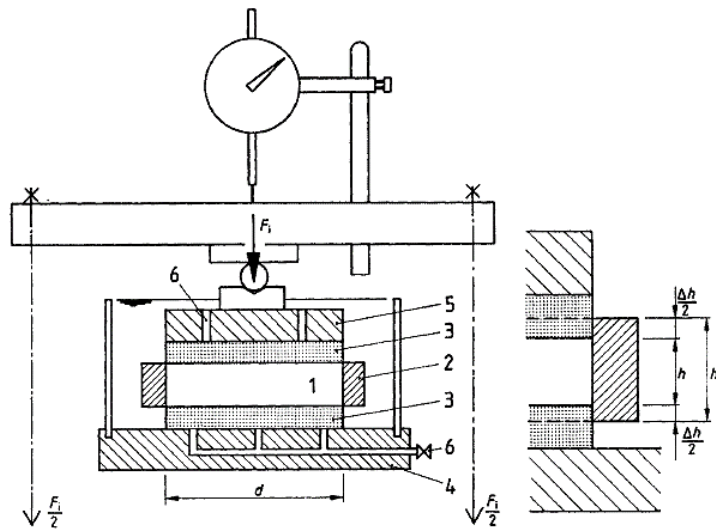
- Geräte mit feststehendem Ring und
- Geräte mit schwebendem Ring

Bei Geräten mit schwebendem Ring kann nicht nur die obere Filterplatte in den Ring eindringen, sondern auch die untere Filterplatte.



- |   |                            |   |                      |
|---|----------------------------|---|----------------------|
| 1 | scheibenförmige Bodenprobe | 4 | starre Grundplatte   |
| 2 | Probeneinspannring         | 5 | starre Druckplatte   |
| 3 | Filterplatten              | 6 | Be- und Entwässerung |

Abbildung 12: Schema eines Kompressionsgerätes mit starrer Druckplatte, zentrischer Lasteintragung und feststehendem Ring (ÖNORM B 4420)



- |   |                            |   |                      |
|---|----------------------------|---|----------------------|
| 1 | scheibenförmige Bodenprobe | 4 | starre Grundplatte   |
| 2 | Probeneinspannring         | 5 | starre Druckplatte   |
| 3 | Filterplatten              | 6 | Be- und Entwässerung |

Abbildung 13: Schema eines Kompressionsgerätes mit starrer Druckplatte, zentrischer Lasteintragung und schwebendem Ring (ÖNORM B 4420)

Die Lastaufbringung erfolgt bei diesen Geräten mechanisch durch zentrische Einzellasten über eine Druckplatte, welche kontrolliert über Gehänge, Belastungshebel, Belastungsjoche und Kugelgelenke aufgebracht werden. Für das Eigengewicht dieser Einrichtungen müssen Gegengewichte zum austarieren aufgebracht werden.

Die Verformung wird mit einer Messeinrichtung, welche unabhängig von der Belastungseinrichtung auf der Ödometerzelle montiert ist, gemessen. Die Ablesegenauigkeit dieser Messeinrichtung beträgt 1/100mm.

### 2.4.1.1 Ödometer nach *Terzaghi* (1925)

Beim Ödometer nach *Terzaghi* (1925) handelt es sich um eine Weiterentwicklung von Kompressionsgeräten. Das Ödometer besteht aus einer Versuchszelle mit festgelagertem Ring, in welchen die ungestörte Probe eingebaut wird. Die Probe wird hier mittels Ausstechring aus der ungestörten Bodenprobe ausgestochen und danach mit einem Stempel in das Ödometer eingedrückt. Oberhalb und unterhalb dieses Ringes befinden sich Filtersteine, um eine Entwässerung der Probe zu ermöglichen.

Die Lastaufbringung erfolgt mechanisch durch zentrische Einzellasten über eine Druckplatte, welche kontrolliert über Gehänge, Belastungshebel, Belastungsjoche und Kugelgelenk aufgebracht werden. Für das Eigengewicht dieser Einrichtungen müssen Gegengewichte zum Austarieren aufgebracht werden. Die Wasserzugabe erfolgt am unteren Rand der Probe und wird über eine Messburette mechanisch geregelt.

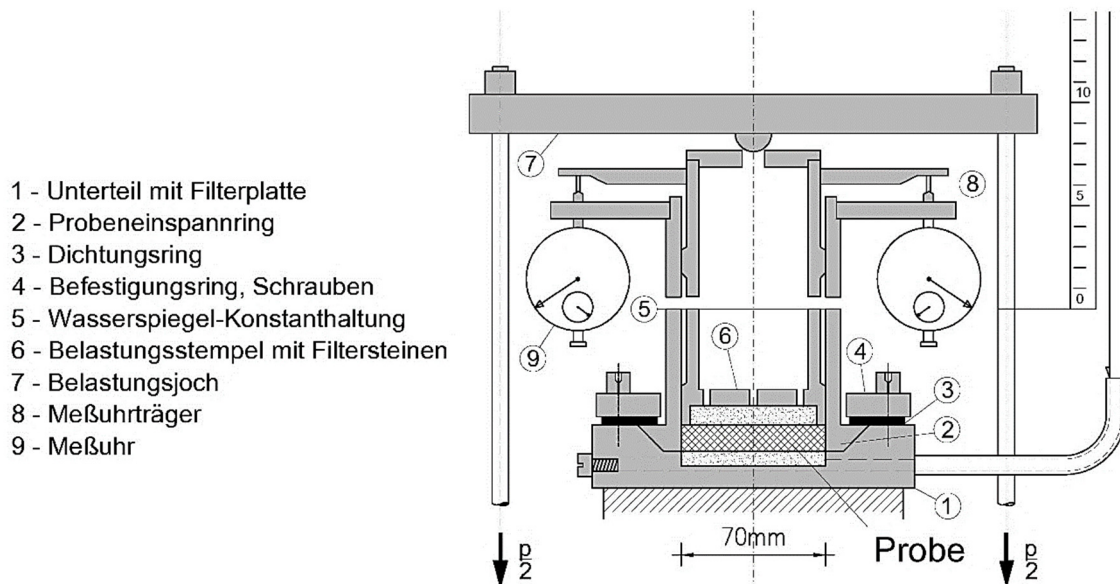


Abbildung 14: Ödometer nach *Terzaghi* (1925)

Nachdem beim Ödometer nach *Terzaghi* (1925) die Probe ohne Ausstechring eingebaut wird und dadurch die Ausgangshöhe nicht genau definiert ist, muss zur Bestimmung der Ausgangshöhe die Probe nach Erreichen der Höchstlast unter Wasser gesetzt werden, damit sämtliche Poren mit Wasser gefüllt sind. Nur unter der Voraussetzung voller Wassersättigung ist der Versuch auswertbar.

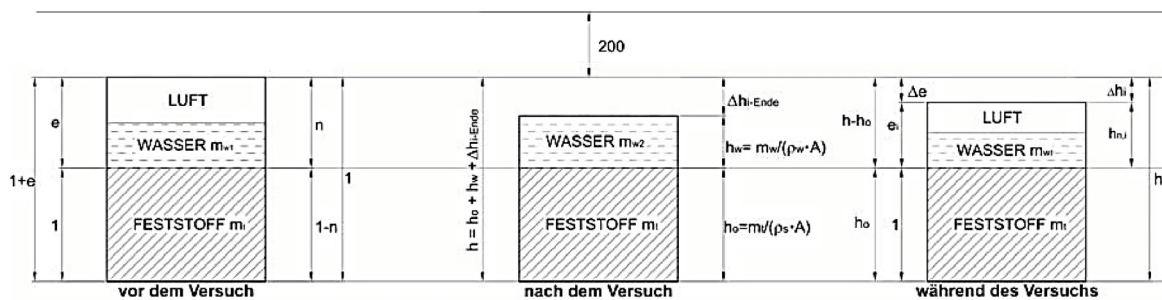


Abbildung 15: Einheitswürfel vor, nach und während des Kompressionsversuches (Adam, 2016)

Die Setzungen  $h_i$  bzw.  $\Delta h_{i,Ende}$  werden im Versuch gemessen, wobei die Anfangshöhe  $h$  nach Beendigung des Versuches rückgerechnet wird:

$$h = \Delta h_{i,Ende} + h_w + h_o \quad (2.34)$$

mit der rechnerischen Höhe des Wasseranteils:

$$h_w = \frac{m_{w2}}{A \cdot \rho_w} \quad (2.35)$$

und der rechnerischen Höhe des Feststoffanteils:

$$h_o = \frac{m_t}{A \cdot \rho_s} \quad (2.36)$$

Die restlichen Kenngrößen werden mittels Laboruntersuchungen bestimmt.

### 2.4.2 Abmessung der Proben

Normalerweise wird der Kompressionsversuch an ungestörten Bodenproben durchgeführt. Nur in Ausnahmefällen kann eine aufbereitete Probe verwendet werden.

Für Tone, Schluffe und Sande gelten folgende Abmessungen:

- der Durchmesser beträgt im Regelfall 70 mm – 100 mm, die Ausgangshöhe nicht mehr als 20 mm;
- bei Geräten mit festem Ring soll ein Verhältnis der Probenabmessungen von  $h_0 : d \cong 1 : 3,5$  bis  $1 : 5$  eingehalten werden;

- bei Geräten mit schwebenden Ring soll ein Verhältnis der Probenabmessung von  $h_0 : d \cong 1 : 2,5$  eingehalten werden.

### 2.4.3 Probenherstellung

Mit Hilfe eines dünnwandigen Ausstechringes wird bei ungestörten, feinkörnigen und bindigen Böden die Bodenprobe vorsichtig ausgestochen. Je nach Kompressionsgerät wird die Bodenprobe gemeinsam mit dem Ausstechring in das Gerät eingebaut, oder mit einem Stempel in den Probeneinspannring des Gerätes eingedrückt.

Werden gestörte Böden untersucht, so ist die Bodenprobe aufzubereiten und mit annähernd gleicher Dichte und gleichem Wassergehalt einzubauen.

In der Regel werden bei feinkörnigen Böden Bodenproben mit einem Durchmesser von 50mm bis 100mm und einer Anfangsprobenhöhe von nicht mehr als 20mm verwendet.

### 2.4.4 Versuchsdurchführung

Nach erfolgtem Einbau der Bodenprobe in das Kompressionsgerät muss die Probe mit 2 kPa vorbelastet werden. Dies stellt einen direkten Kraftschluss zwischen Kompressionsgerät und Belastungseinrichtung sicher.

Nun erfolgt die stufenweise Belastung der Probe, wobei eine Belastungsstufe gemäß *ÖNORM B 4420* so lang konstant gehalten werden muss, bis die Geschwindigkeit der Zusammendrückung auf mindestens 0,5% der Anfangsprobenhöhe je Stunde abgeklungen ist. Dies wird in der Regel spätestens nach 24 Stunden erreicht. Die nächsthöhere Laststufe ist so zu wählen, dass sie die vorherige in etwa verdoppelt, wobei die Höchstbelastung in fünf Laststufen erreicht werden soll. Die gleichen Bedingungen müssen bei Entlastungsstufen erfüllt werden, wobei in diesem Fall jede zweite Laststufe übersprungen werden kann.

Am Ende jeder Laststufe (und im Bedarfsfall auch periodisch während einer Laststufe) muss die Zusammendrückung an der Messeinrichtung abgelesen und protokolliert werden.

Der Wassergehalt der Probe sollte bis zum Erreichen der Höchstlast nicht verändert werden, da dieser maßgeblich für das Zusammendrückungsverhalten des Bodens ist.

### 2.4.5 Auswertung

Folgende Größen sind für die rechnerische Auswertung des Kompressionsversuches notwendig:

- Querschnittsfläche der Probe  $A$  (cm<sup>2</sup>)
- Höhe der Probe vor Versuchsdurchführung  $h_0$  (cm)
- Trockenmasse  $m_t$  (g)
- Korndichte  $\rho_s$  (g/cm<sup>3</sup>)
- Zusammendrückung pro Laststufe  $\Delta h_i$  (cm)

Mit den erlangten Größen kann für jede Laststufe nach Erreichen der Endsetzung, die bezogene Zusammendrückung (Stauchung/Dehnung):

$$\varepsilon_{i,\text{end}} = \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \quad (2.37)$$

und/oder die Porenzahl

$$e_{i,\text{end}} = \frac{\rho_s A (h_0 - \sum \Delta h_i)}{m_t} - 1 \quad (2.38)$$

berechnet werden.

Die Darstellung der Stauchung/Dehnung  $\varepsilon$  und der Porenzahl  $e$  erfolgt in Abhängigkeit von der Druckspannung  $\sigma$  für Belastung und Entlastung. Die Versuchswerte  $\varepsilon$  oder  $e$  werden auf der vertikalen Achse linear, die Druckspannung  $\sigma$  auf der horizontalen Achse entweder linear oder logarithmisch aufgetragen. Die Versuchspunkte sind durch Kurven oder polygonal zu einem Druck-Zusammendrückungs- bzw. Druck-Porenzahl-Diagramm zu verbinden.

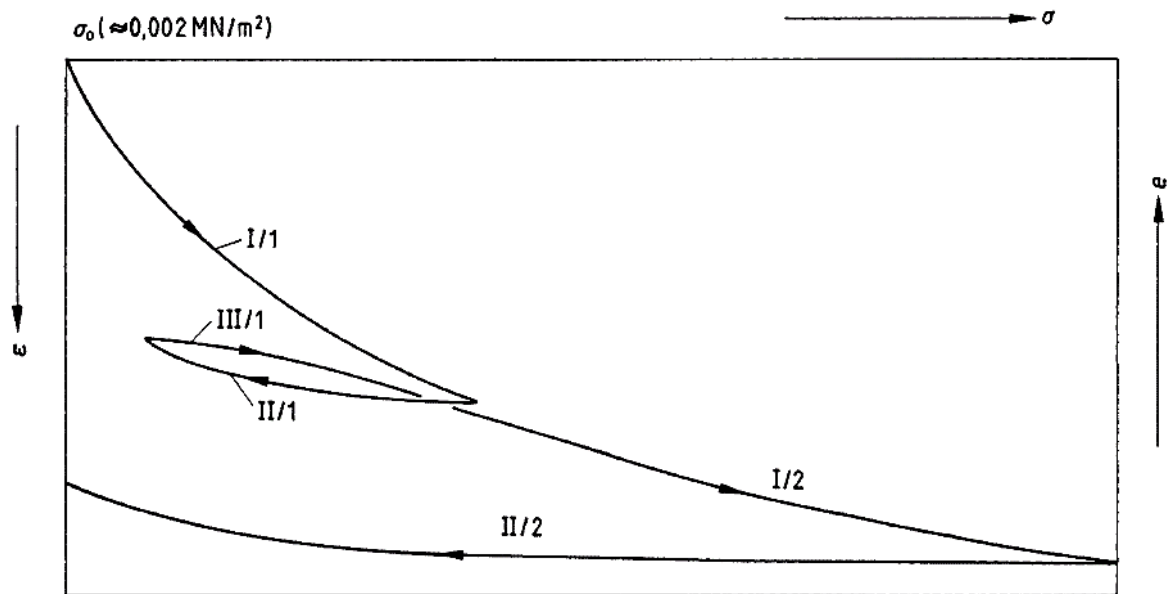


Abbildung 16: Druck-Zusammendrückungs-Diagramm im linearen Maßstab (ÖNORM B 4420)

Die Ermittlung des Steifemoduls  $E_s$  hat für eine bestimmte Spannung aus der Tangente (siehe Abbildung 17) oder für ein bestimmtes Spannungsintervall aus der Sekante (siehe Abbildung 18) zu erfolgen.

Wird  $E_s$  als Tangentenmodul ermittelt, gilt:

- bei Verwendung des Druck-Zusammendrückungs-Diagrammes:

$$E_s = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \quad (2.39)$$

- bei Verwendung des Druck-Porenzahl-Diagrammes:

$$E_s = \frac{d\sigma_i}{de_i} \cdot (1 + e_i) \quad (2.40)$$

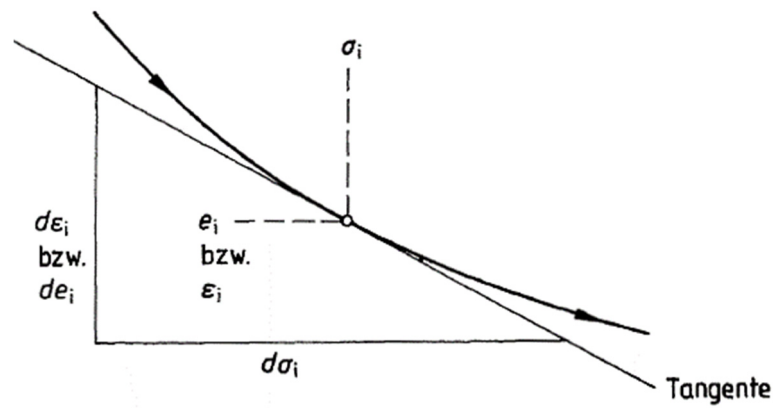


Abbildung 17: Ermittlung des Tangentenmoduls (ÖNORM B 4420)

Wird  $E_s$  als Sekantenmodul ermittelt, gilt:

- bei Verwendung des Druck-Zusammendrückungs-Diagrammes:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\varepsilon_i} \quad (2.41)$$

- bei Verwendung des Druck-Porenzahl-Diagrammes:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta e_i} \cdot (1 + e_i) \quad (2.42)$$

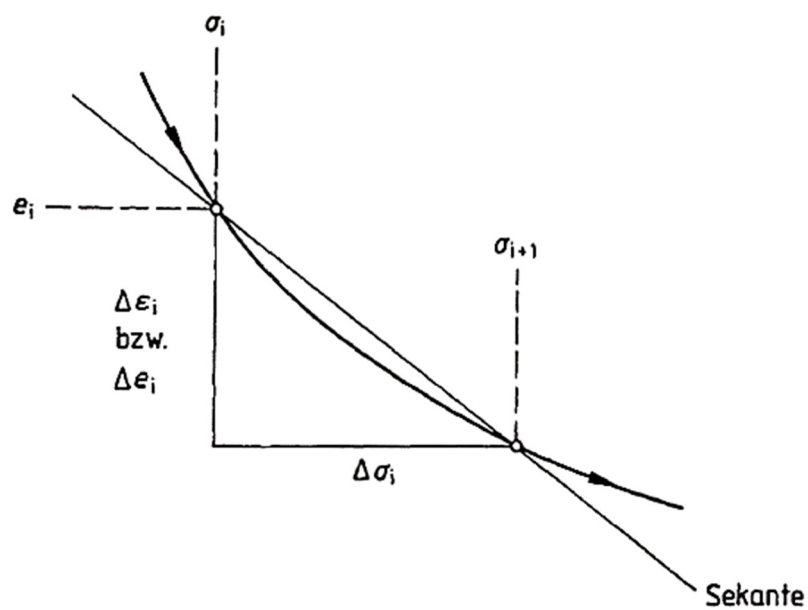


Abbildung 18: Ermittlung des Sekantenmoduls (ÖNORM B 4420)



Da es sich beim Steifemodul  $E_s$  um eine spannungsabhängige Größe handelt, kann man hier nicht von einem konstanten Bodenkennwert sprechen. Der Steifemodul eines Bodens wird von vielen Faktoren beeinflusst, sodass unterschieden werden muss, ob es sich um eine Erstbelastung oder eine Ent- bzw. Wiederbelastung handelt. So erfährt der Boden nach Entnahme aus seiner ursprünglichen Umgebung eine Entspannung, welche den tatsächlichen Steifemodul  $E_s$  gegenüber dem Erstbelastungsmodul  $E_{s1}$  höher erscheinen lässt. Der Wiederbelastungsmodul  $E_{s2}$  wiederum liefert zu hohe Werte, sodass der tatsächliche Wert in der Regel zwischen diesen beiden Werten liegt.

Für Vorabschätzungen können folgende Anhaltswerte für den Erstbelastungsmodul  $E_{s1}$  herangezogen werden:

Bodenart	$E_{s1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Sand, locker, rund	20 - 50
Sand, locker, eckig	40 - 80
Sand, mitteldicht, rund	50 - 100
Sand, mitteldicht, eckig	80 - 150
Kies ohne Sand	100 - 200
Sand, dicht, eckig	150 - 250
Schluff	3 - 10

Bodenart	$E_{s1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Ton, halbfest	5 - 10
Ton, schwer knetbar, steif	2,5 - 5
Ton, leicht knetbar, weich	1 - 2,5
Geschiebemergel, fest	30 - 100
Lehm, halbfest	5 - 20
Lehm, weich	4 - 8
Torf	0,4 - 1

Tabelle 2: Anhaltswerte für den Erstbelastungsmodul  $E_{s1}$

Der Kompressionsbeiwert  $C_c$  wird aus dem geradlinigen Abschnitt des Erstbelastungsastes im Druck-Zusammendrückungs-Diagramm ermittelt. Es gilt:

$$C_c = \tan \beta = - \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma} \quad (2.43)$$

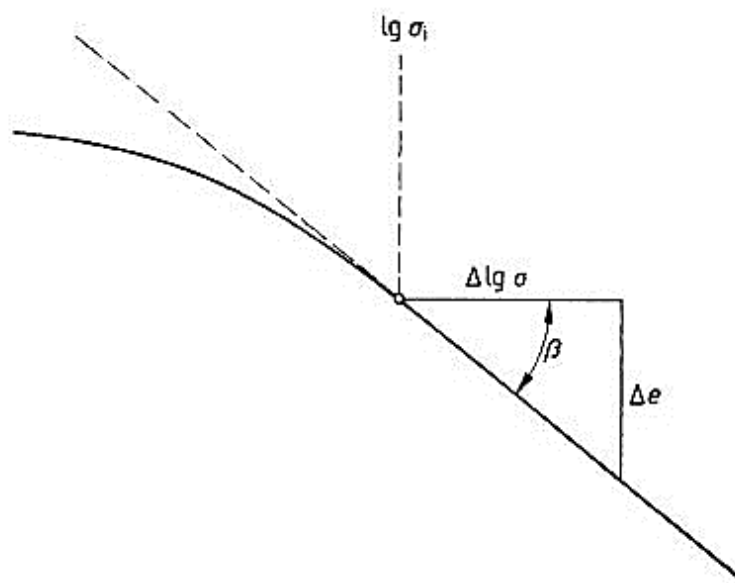


Abbildung 19: Ermittlung des Kompressionsbeiwertes  $C_c$  (ÖNORM B 4420)

Der Schwellbeiwert  $C_s$  wird aus dem Sekantenabschnitt des Entlastungsastes im Druck-Zusammendrückungs-Diagramm ermittelt:

$$C_s = \tan \gamma = - \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma} \quad (2.44)$$

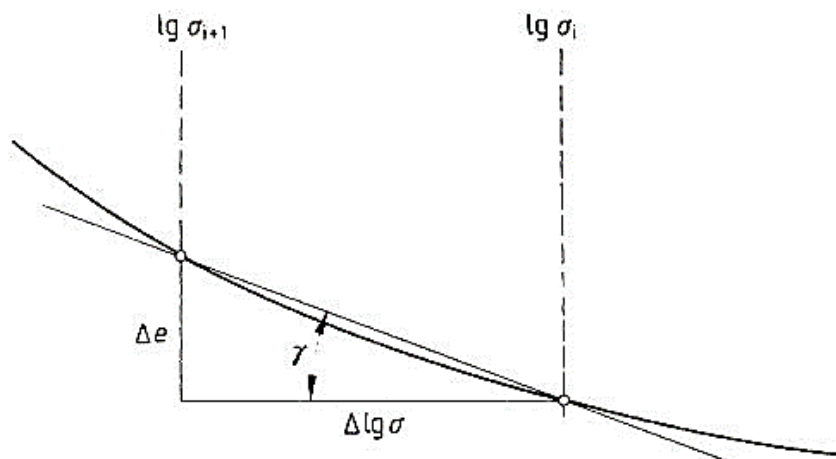


Abbildung 20: Ermittlung des Schwellbeiwertes  $C_s$  (ÖNORM B 4420)

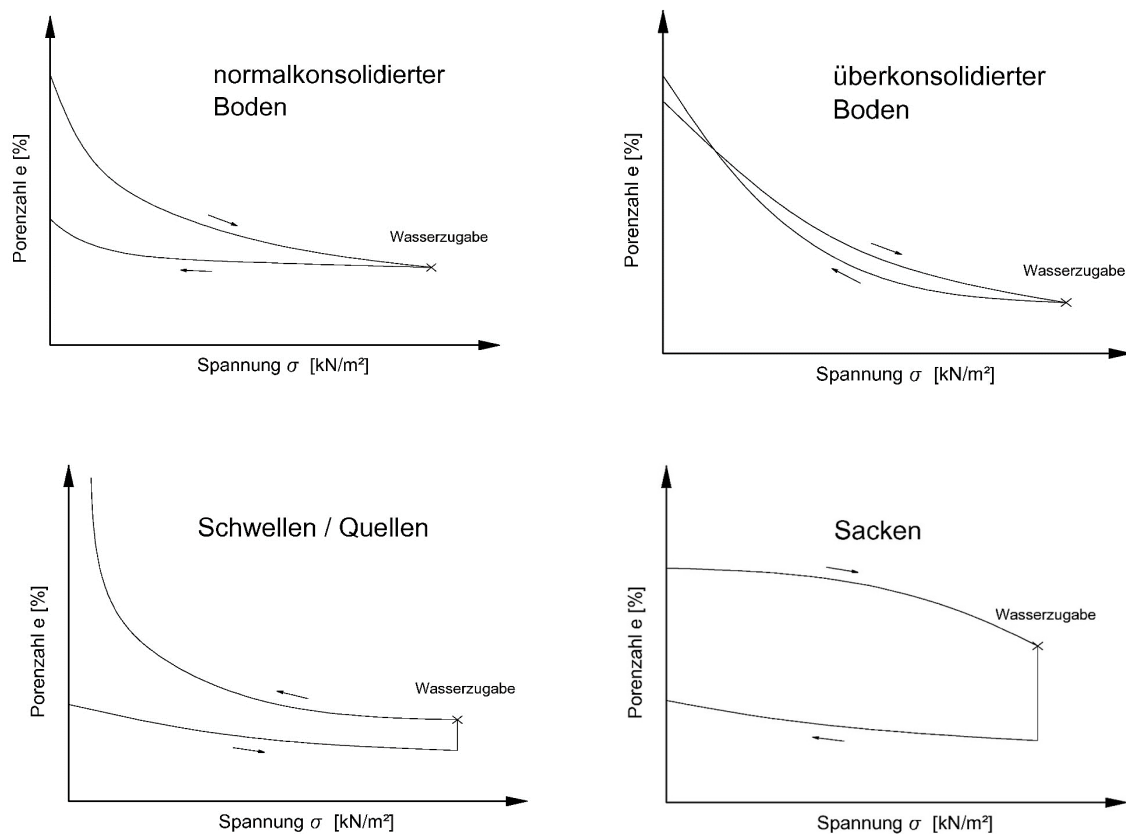


Abbildung 21: Druck-Porenzahl-Diagramm unterschiedlicher Böden

### 2.4.6 Zeit-Zusammendrückungsbeziehung

Für die rechnerische Auswertung sind folgende Größen notwendig:

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| - Querschnittsfläche der Probe            | A (cm <sup>2</sup> )                |
| - Höhe der Probe vor Versuchsdurchführung | h <sub>i,0</sub> (cm)               |
| - Trockenmasse                            | m <sub>t</sub> (g)                  |
| - Korndichte                              | ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) |
| - Zusammendrückung                        | Δh <sub>i</sub> (cm)                |

Diese Größen sind zu den Messzeitpunkten t jeder Laststufe i notwendig. Somit wird innerhalb jeder Laststufe die bezogene Zusammendrückung (Stauchung/Dehnung) mit:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h_{i,0}} \quad (2.45)$$

und die Porenzahl e<sub>i,0</sub> und e<sub>i</sub> berechnet:

$$e_{i,0} = \frac{\rho_s A \cdot h_{i,0}}{m_t} - 1 \quad (2.46)$$

$$e_i = \frac{\rho_s A (h_{i,0} - \Delta h_i)}{m_t} \quad (2.47)$$

Die graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Stauchung/Dehnung innerhalb einer Laststufe kann im linearen Maßstab oder im halblogarithmischen Maßstab erfolgen.

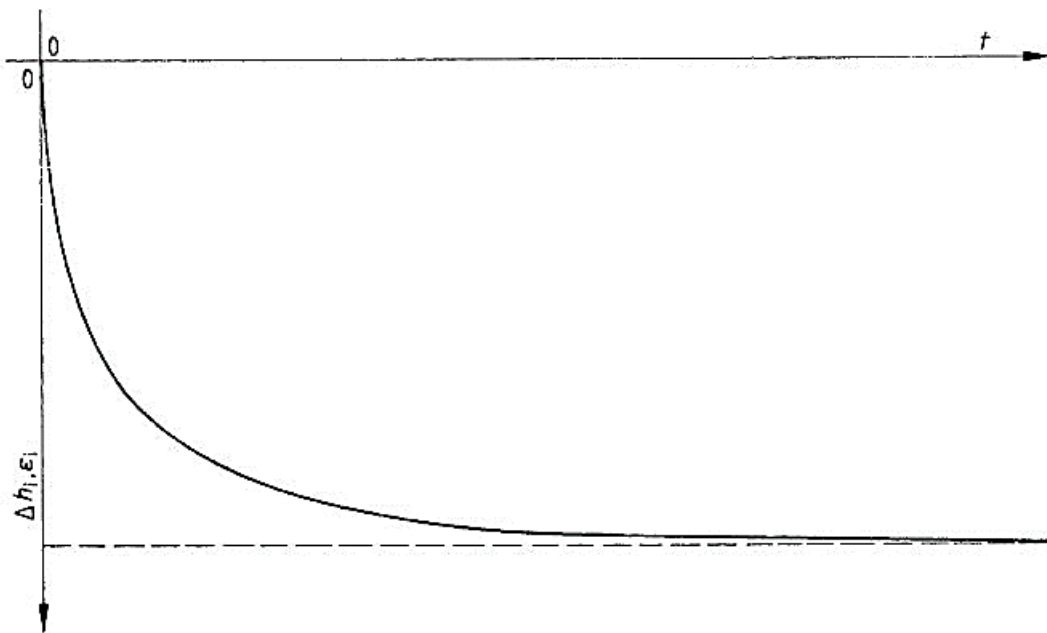


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Stauchung bei einer Laststufe im linearen Maßstab  
(ÖNORM B 4420)

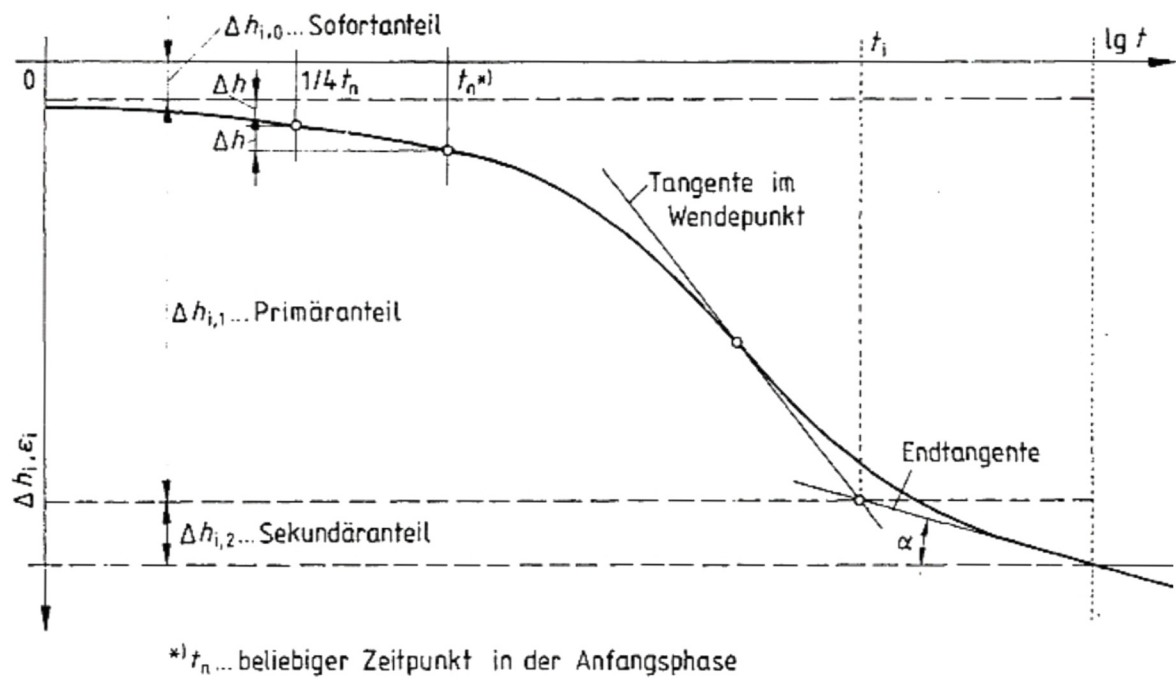


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Stauchung bei einer Laststufe im halblogarithmischen Maßstab (ÖNORM B 4420)

In der Regel wird bei durchlässigen Böden der zeitliche Verlauf der Stauchung im linearen Maßstab dargestellt, bei gering durchlässigen Böden wird die Darstellung im halblogarithmischen Maßstab gewählt.

### 3. Laborversuche zum Spannungs- Verformungsverhalten

#### 3.1 Klassifikation der Bodenproben

Um die Kompressionsversuche an Bodenproben mit einer annähernd gleichmäßigen Zusammensetzung und Konsistenz durchzuführen, wurden vor Beginn der Kompressionsversuche an den Proben stichprobenartig der Wassergehalt, die Zustandsgrenzen, die Korngrößenverteilung und die Korndichte bestimmt. An den Ergebnissen ist gut zu erkennen, dass die untersuchten Proben annähernd dieselben Klassifikationen aufweisen und so mögliche Störungen und Streuungen bezüglich Zusammensetzung und Konsistenz des Bodens minimiert sind.



*Abbildung 24: Untersuchter Boden "Wiener Tegel"*

##### 3.1.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt wurde lt. *ÖNORM B 4410* mittels Ofentrocknung bestimmt und reichte bei den untersuchten Proben von 22,1% bis 25,5%. Daraus ergab sich ein Mittelwert des Wassergehaltes von 25,2%.

### 3.1.2 Zustandsgrenzen

Um die Zustandsgrenzen des untersuchten Bodens zu bestimmen, wurden die Konsistenzgrenzen nach *Atterberg* bestimmt. Diese Versuche liefern die Fließgrenze, die Ausrollgrenze und die Schrumpfgrenze eines Bodens. Da es sich, wie bereits beschrieben um einen weitgehend homogenen Boden handelt, wurden nicht an allen Proben die Zustandsgrenzen bestimmt, sondern nur an drei. Die Zustandsgrenzen wurden gemäß *ÖNORM B 4411* bestimmt.

Nr.	w <sub>L</sub> [%]	w <sub>P</sub> [%]	I <sub>P</sub> [%]
1A	42,5	27,5	15,0
1B	42,5	28,0	14,5
1C	43,0	27,0	16,0
<b>Mittelwert</b>	<b>42,7</b>	<b>27,5</b>	<b>15,2</b>

*Tabelle 3: Zustandsgrenzen nach Atterberg*

Auf Grund der Ergebnisse der Konsistenzgrenzen nach *Atterberg*, sowie der A-Linie nach *Casagrande*, handelt es sich bei dem Boden um einen mittelplastischen Schluff der Bodengruppe Si,M.

### 3.1.3 Korngrößenverteilung

Zur Bestimmung der Kornverteilungslinie der verwendeten Bodenprobe wurden Schlämmanalysen durchgeführt. Da es sich augenscheinlich um einen äußerst homogenen Boden handelte, wurden lediglich zwei Schlämmanalysen durchgeführt.

Hierfür wurde die Bodenprobe im destillierten Wasser mehrere Stunden eingeweicht und anschließend in einem Messzylinder mit destilliertem Wasser vermischt und auf 1000cm<sup>3</sup> aufgefüllt. Um eine Koagulation zu vermeiden, wurde ein Dispergierungsmittel hinzugefügt. Danach wurde die Suspension gut durchmischt, auf einen Tisch gestellt und mittels Stoppuhr die Zeit gemessen. Die zeitliche Änderung der Dichte wurde mit einem Aräometer von *Casagrande* gemessen und daraus die Kornverteilung berechnet.

Die Auswertung erfolgte über Nomogramme gemäß *ÖNORM B 4412*.

Die Darstellung der Kornverteilungslinie des „Wiener Tegels“ lässt erkennen, dass der Tonanteil bei ca. 23% der Gesamtmasse liegt und der Schluffanteil bei ca. 77%.

Die vorhandenen Sandanteile sind mit 0,3% vernachlässigbar. Hiermit handelt es sich bei dem untersuchten Boden hinsichtlich der Korngrößenverteilung um einen tonigen Schluff.

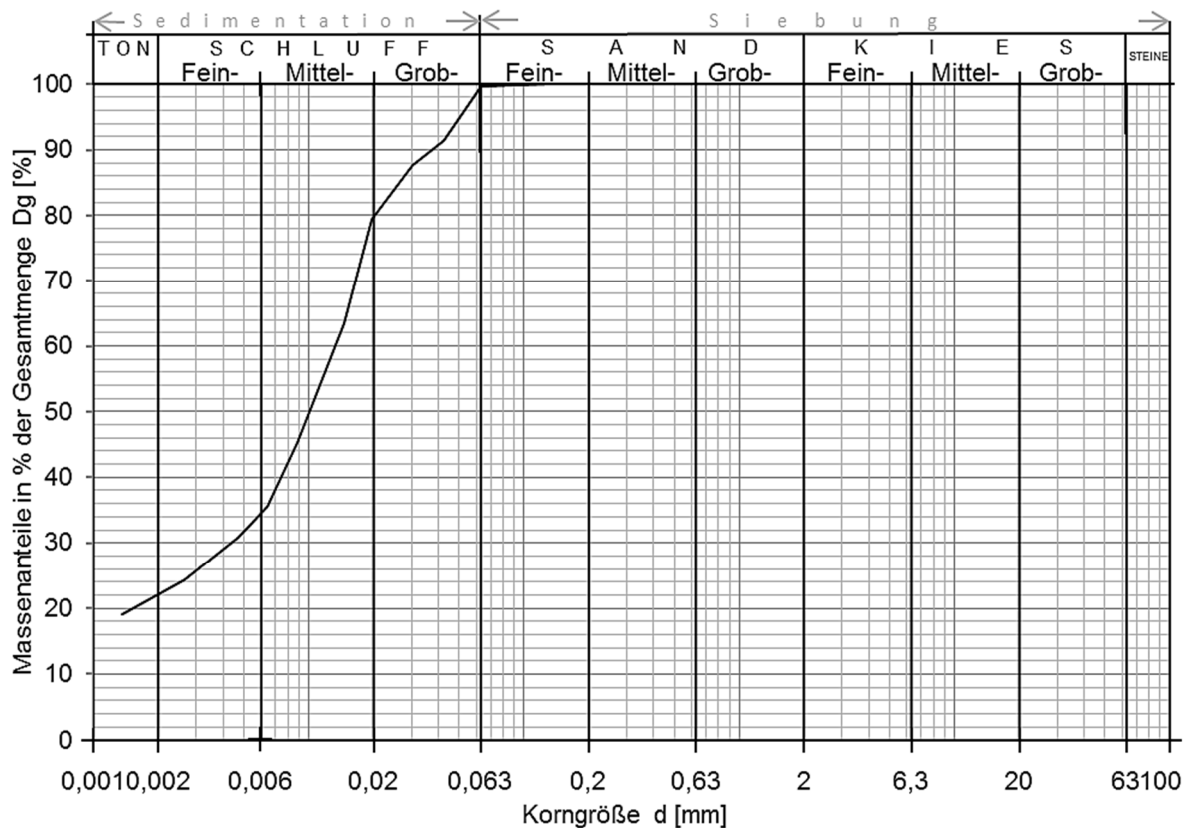


Abbildung 25: Kornverteilungslinie der verwendeten Bodenprobe „Wiener Tegel“

#### 3.1.4 Korndichte

Auf Grund der weitgehend homogenen Zusammensetzung des Bodens, wurde nicht bei allen Proben die Korndichte bestimmt. Bei neun Proben wurden Korndichten zwischen  $2,74 \text{ g/cm}^3$  und  $2,78 \text{ g/cm}^3$  ermittelt. Daraus ergab sich eine mittlere Korndichte von  $\rho_s = 2,76 \text{ g/cm}^3$ . Die Korndichte wurde wie in der ÖNORM B 4413 beschrieben bestimmt.

### 3.2 Kompressionsversuche - Versuchsmethoden

In den folgenden Kapiteln werden zwei Kompressionsgeräte, mit welchen die Versuche durchgeführt wurden, genauer beschrieben. Dabei handelt es sich einerseits um ein klassisches Ödometer nach *Terzaghi* (1925), und andererseits um ein elektronisch, vollautomatisch gesteuertes Kompressionsgerät der Fa. Wille.



Einen Überblick der durchgeführten unterschiedlichen Versuchsarten mit den jeweiligen Geräten, verschafft die im nächsten Kapitel dargestellte Tabelle.

### 3.2.1 Übersicht der durchgeführten Versuche

Nr.	Prüfstand	Zellenart + Durchmesser	Art der Belastung	Belastungsrate
1A	mechan. Prüfstand	konventionell 57,50 mm	Standardversuch mit stufenweiser Belastung	Belastung alle 24 Stunden um das Doppelte erhöhen
1B	mechan. Prüfstand	konventionell 57,50 mm	Standardversuch mit stufenweiser Belastung	Belastung alle 24 Stunden um das Doppelte erhöhen
2A	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	Standardversuch mit stufenweiser Belastung	Belastung alle 24 Stunden um das Doppelte erhöhen
2B	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	Standardversuch mit stufenweiser Belastung	Belastung alle 24 Stunden um das Doppelte erhöhen
2C	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	Standardversuch mit stufenweiser Belastung	Belastung alle 24 Stunden um das Doppelte erhöhen
3A	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL mit Nachbildung der Stufen des Standardversuches	abschnittsweise konstante Belastungsrate welche alle 24 Stunden erhöht wird
3B	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL mit Nachbildung der Stufen des Standardversuches	abschnittsweise konstante Belastungsrate welche alle 24 Stunden erhöht wird
3C	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL mit Nachbildung der Stufen des Standardversuches	abschnittsweise konstante Belastungsrate welche alle 24 Stunden erhöht wird
3D_K0	autom. Prüfpresse	K0- Zelle 70 mm	CRL mit Nachbildung der Stufen des Standardversuches	abschnittsweise konstante Belastungsrate welche alle 24 Stunden erhöht wird
4A	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL mit Nachbildung des Standardversuches	eine konstante Belastungsrate über gesamten Versuch
4B	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL mit Nachbildung des Standardversuches	eine konstante Belastungsrate über gesamten Versuch
4C	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL mit Nachbildung des Standardversuches	eine konstante Belastungsrate über gesamten Versuch
4D_K0	autom. Prüfpresse	K0- Zelle 70 mm	CRL mit Nachbildung des Standardversuches	eine konstante Belastungsrate über gesamten Versuch
5A	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50mm	CRL	konstante Belastungsrate lt. Literatur mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h
5B	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50mm	CRL	konstante Belastungsrate lt. Literatur mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h
5C	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL	konstante Belastungsrate lt. Literatur mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h
6A	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50mm	CRL	konstante Belastungsrate mit 22,5 kN/m <sup>2</sup> /h
6B	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL	konstante Belastungsrate mit 22,5 kN/m <sup>2</sup> /h
6C	autom. Prüfpresse	konventionell 54,50 mm	CRL	konstante Belastungsrate mit 22,5 kN/m <sup>2</sup> /h

Tabelle 4: Übersichtstabelle der durchgeführten Versuche

### 3.3 Kompressionsgerät mit mechanischer Lastaufbringung

#### 3.3.1 Geräteaufbau

Beim Ödometer nach *Terzaghi* (1925) handelt es sich um eine Versuchszelle mit festgelagertem Ring, in welchen die ungestörte Probe eingebaut wird. Oberhalb und unterhalb dieses Ringes befinden sich Filtersteine, um eine Entwässerung der Probe zu ermöglichen. Die Lastaufbringung erfolgt mechanisch durch zentrische Einzellasten über eine Druckplatte, welche kontrolliert über Gehänge, Belastungshebel, Belastungsjoche und Kugelgelenk aufgebracht werden. Für das Eigengewicht dieser Einrichtungen müssen Gegengewichte zum Austarieren aufgebracht werden. Die Wasserzugabe erfolgt am unteren Rand der Probe und wird über eine Messbürette mechanisch geregelt.

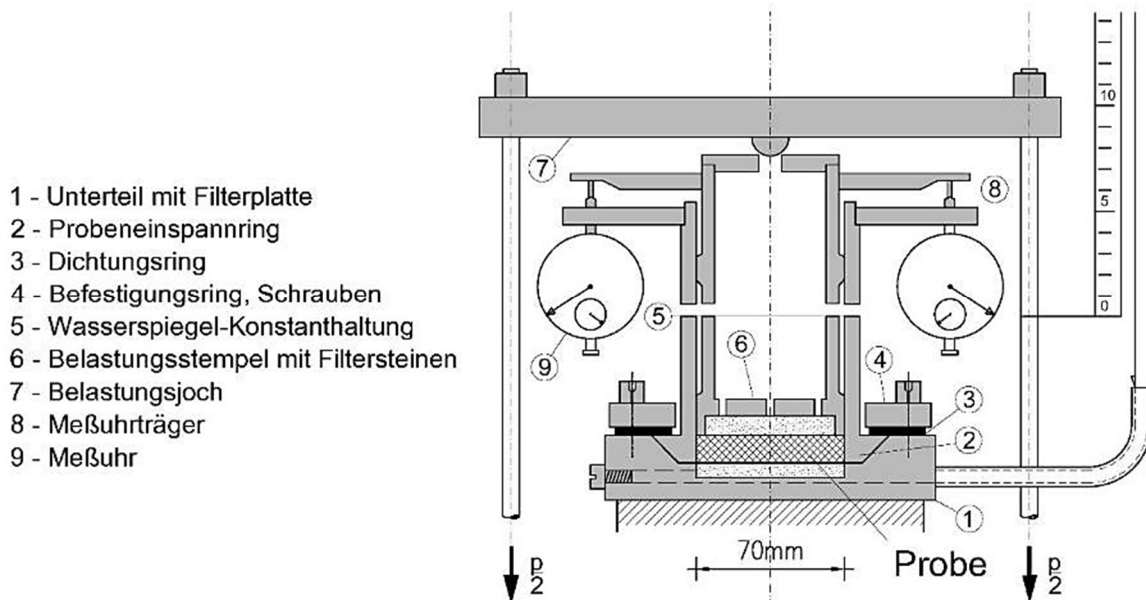


Abbildung 26: Skizze des Ödometers nach Terzaghi (1925)



Abbildung 27: Prüfstand mit Ödometern nach Terzaghi (1925) im Erdbaulaboratorium TU Wien

#### 3.3.2 Versuchsdurchführung und Datenerfassung

Mit diesem Gerät können, wie unter 2.2 erwähnt, nur Versuche mit inkrementeller Lastaufbringung durchgeführt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden die Versuche am Standard-Ödometer gemäß ÖNORM 4420 durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden Bodenproben mit einem Durchmesser von 5,75 cm und einer Höhe von 2,0 cm verwendet. Die Probe wurde mittels Ausstechring aus der ungestörten Bodenprobe ausgestochen und danach mit einem Stempel in das Ödometer eingedrückt.

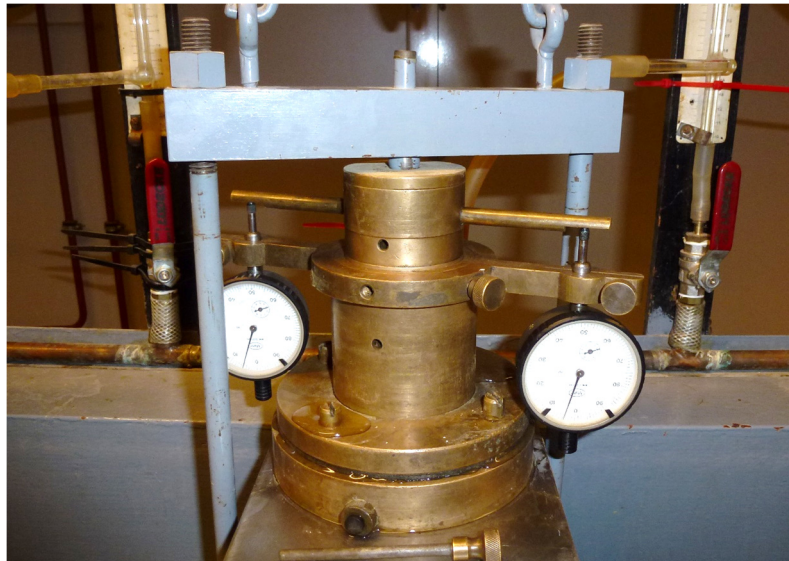
Die Laststeigerung erfolgte alle 24 Stunden, wobei die Last dabei jedes Mal verdoppelt wurde. Ebenso wurde bei den Entlastungsstufen vorgegangen. Die Wasserzugabe erfolgte nach Erreichen der maximalen Belastung.

Die Verformung wurde mit zwei Messuhren, welche unabhängig von der Belastungseinrichtung auf der Ödometerzelle montiert sind, gemessen. Die beiden

### 3 Laborversuche zum Spannungs-Verformungsverhalten

---

Messuhren sind beidseitig angebracht und weisen eine Ablesegenauigkeit von  $1/100\text{mm}$  auf.



*Abbildung 28: Ödometer nach Terzaghi (1925) mit zwei Messuhren*

Bevor mit der Laststeigerung begonnen wurde, wurde die Bodenprobe mit  $5 \text{ kN/m}^2$ , 24 Stunden lang vorbelastet. Danach wurde erst mit dem eigentlichen Kompressionsversuch begonnen.

In nachstehender Tabelle wird der genaue Verlauf der Belastung des Standard-Ödometerversuches dargestellt:

Laststufe	Dauer	Belastungsart	Spannung
1	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	33 kN/m <sup>2</sup>
2	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	62 kN/m <sup>2</sup>
3	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	118 kN/m <sup>2</sup>
4	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	250 kN/m <sup>2</sup>
5	24 Stunden	stufenweise Entlastung	118 kN/m <sup>2</sup>
6	24 Stunden	stufenweise Entlastung	33 kN/m <sup>2</sup>
7	24 Stunden	stufenweise Entlastung	5 kN/m <sup>2</sup>
8	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	33 kN/m <sup>2</sup>
9	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	62 kN/m <sup>2</sup>
10	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	118 kN/m <sup>2</sup>
11	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	250 kN/m <sup>2</sup>
12	24 Stunden	stufenweise Erhöhung	496 kN/m <sup>2</sup>
13	24 Stunden	Wasserzugabe	496 kN/m <sup>2</sup>
14	24 Stunden	stufenweise Entlastung	250 kN/m <sup>2</sup>
15	24 Stunden	stufenweise Entlastung	118 kN/m <sup>2</sup>
16	24 Stunden	stufenweise Entlastung	33 kN/m <sup>2</sup>
17	24 Stunden	stufenweise Entlastung	5 kN/m <sup>2</sup>

*Tabelle 5: Versuchsablauf des Standard-Ödometerversuches im mechanischen Kompressionsgerät*

Die Verformungen wurden nach Ende der jeweiligen Laststufe, bevor die Belastung erhöht wurde, an den zwei Messuhren links und rechts abgelesen und notiert.

Um einerseits den Einfluss des Wassers bezüglich des Zeitsetzungsverhaltens zu erhalten und andererseits die physikalischen Verhältnisse der Probe ermitteln zu können, wurde nach Erreichen der Höchstlast die Probe unter Wasser gesetzt.

Nach dem Ende des Versuches wurden die Proben ausgebaut, im feuchten Zustand gewogen, danach im Ofen bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und danach wiederum gewogen.

Die Auswertung erfolgte in der institutseigenen Software „EBLAB“. Die Auswertungen des Kompressionsversuches basieren auf den in unter Punkt 2.3. beschriebenen theoretischen Grundlagen.

Da bei den Versuchen im Kompressionsgerät mit mechanischer Lastaufbringung die Verformungen nicht automatisch aufgezeichnet werden, wurde das Zeit-Setzungsverhalten bei dieser Versuchsreihe nicht untersucht.

## **3.4 Kompressionsgerät mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung und automatischer Messwerterfassung**

### **3.4.1 Geräteaufbau**

Bei diesem Kompressionsgerät handelt es sich um eine elektronisch gesteuerte Prüfpresse der Fa. Wille, welche universell für eine Nennlast von 10 kN ausgelegt ist. Die Prüfpresse kann manuell bedient werden, oder auch mittels PC- Fernsteuerfunktion, wobei die manuelle Bedienung vorrangig für Einrichtfunktionen und für die Durchführung einfacher Versuche benutzt wird.

Das Grundgerät besteht aus einem stabilen Lastrahmen zur Erzeugung von Auflasten, einer elektromotorischen Antriebseinheit und der elektronischen Steuerung, wobei die Lastmesseinrichtung fest integriert ist.

Neben einer internen Wegmesseinrichtung ist auch ein externer Wegsensor für den Betrieb mit Wegregelung erforderlich.





Abbildung 29: Kompressionsgerätstand mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung im Erdbaulaboratorium der TU Wien

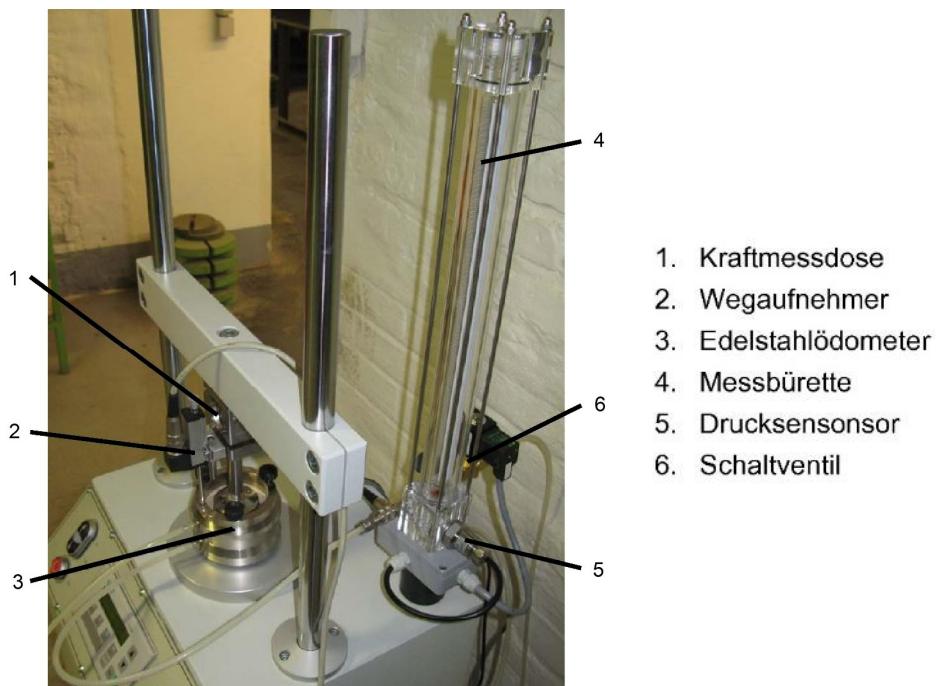


Abbildung 30: Gerätebeschreibung des Kompressionsgerätes der Fa. Wille

Auch bei diesen Geräten erfolgt die Wasserzugabe am unteren Rand der Probe mittels einer Messbürette. Um eine Entwässerung der Probe während der Wasserzugabe zu ermöglichen, ist am oberen Rand der Probe ein Ventil inkl. Entwässerungsschlauch angebracht.

#### 3.4.2 Versuchsdurchführung und Datenerfassung

Die verwendete Prüfpresse kann in drei Betriebsarten betrieben werden:

1. Kraftgesteuert  
Der Antrieb wird so gesteuert, dass eine vorgegebene Kraft konstant oder linear mit der Zeit ansteigend gehalten wird.
2. Weggesteuert  
Der Antrieb wird hier so gesteuert, dass die gewünschte Position näherungsweise gehalten wird.
  - 2.1. Geschwindigkeitsgesteuert  
Der Antrieb erhält über die Steuerung eine konstante Vorschubgeschwindigkeit.

Bei den hier durchgeführten Kompressionsversuchen wurde der Antrieb geschwindigkeitsgesteuert betrieben.

Die Kompressionsversuche wurden, wie schon beschrieben, unter verschiedenen Arten der Belastung durchgeführt. Lediglich der Einbau der Bodenproben erfolgte bei jeder Art der Belastung auf die gleiche Weise.

Hierfür wurde die Bodenprobe mittels Ausstechring aus dem Probenkörper ausgeschnitten und, anders als bei den mechanischen Geräten, gemeinsam mit dem Ausstechring in das Edelstahl-Ödometer eingebaut. Für diese Versuche wurden Proben mit einem Durchmesser von 5,45 cm und einer Höhe von 2,0 cm verwendet.



Abbildung 31: Einbau der Bodenprobe in den Probenring





Abbildung 32: Edelstahl- Ödometer mit eingebautem Ausstechring

#### 3.4.2.1 Standardversuch nach ÖNORM B 4420 mit stufenweiser Belastung

Die Kompressionsversuche wurden unter fünf verschiedenen Belastungsarten durchgeführt. Um Vergleichsversuche aufweisen zu können, wurden zuerst Kompressionsversuche unter den gleichen Bedingungen wie mit den mechanischen Kompressionsgeräten lt. ÖNORM 4420 durchgeführt. Die Laststeigerung erfolgte alle 24 Stunden, wobei die Last dabei jedes Mal verdoppelt wurde. Ebenso wurde bei den Entlastungsstufen vorgegangen. Die Wasserzugabe erfolgte hier ebenfalls nach Erreichen der maximalen Belastung.

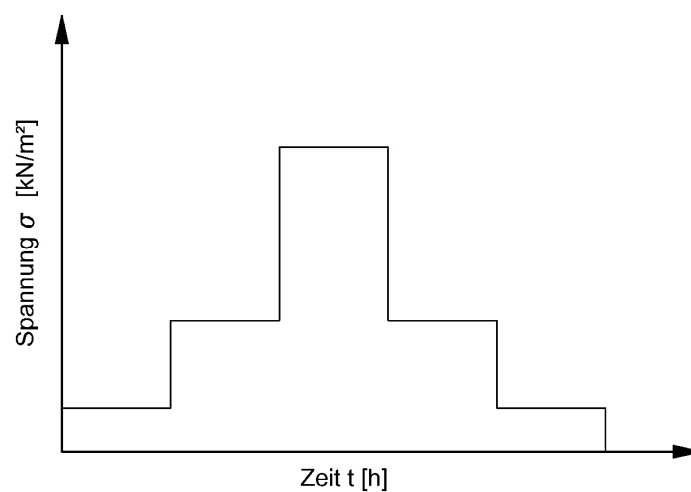


Abbildung 33: Exemplarische Darstellung des Standardversuches nach ÖNORM B 4420

Bevor mit der Laststeigerung begonnen wurde, wurden die Proben 24 Stunden lang mit  $5 \text{ kN/m}^2$  vorbelastet. Nach diesen 24 Stunden wurde erst der Kompressionsversuch gestartet.

In nachstehender Tabelle wird der genaue Verlauf der Belastung des Standard-Ödometersversuches dargestellt:

Laststufe	Dauer	Belastungsart	Spannung
1	24 Stunden	stufenweise	$33 \text{ kN/m}^2$
2	24 Stunden	stufenweise	$62 \text{ kN/m}^2$
3	24 Stunden	stufenweise	$118 \text{ kN/m}^2$
4	24 Stunden	stufenweise	$250 \text{ kN/m}^2$
5	24 Stunden	stufenweise	$118 \text{ kN/m}^2$
6	24 Stunden	stufenweise	$33 \text{ kN/m}^2$
7	24 Stunden	stufenweise	$5 \text{ kN/m}^2$
8	24 Stunden	stufenweise	$33 \text{ kN/m}^2$
9	24 Stunden	stufenweise	$62 \text{ kN/m}^2$
10	24 Stunden	stufenweise	$118 \text{ kN/m}^2$
11	24 Stunden	stufenweise	$250 \text{ kN/m}^2$
12	24 Stunden	stufenweise	$496 \text{ kN/m}^2$
13	24 Stunden	Wasserzugabe	$496 \text{ kN/m}^2$
14	24 Stunden	stufenweise	$250 \text{ kN/m}^2$
15	24 Stunden	stufenweise	$118 \text{ kN/m}^2$
16	24 Stunden	stufenweise	$33 \text{ kN/m}^2$
17	24 Stunden	stufenweise	$5 \text{ kN/m}^2$

*Tabelle 6: Versuchsablauf des Standard-Ödometersversuches im vollautomatischen Kompressionsgerät*

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte vollautomatisch mit einem Messintervall von 6 sec. Die genaue Steuerung der Versuche erfolgte mittels einer vorprogrammierten Prüfvorschrift, in welcher unter anderem auch die aufzuzeichnenden Parameter festgelegt wurden. Hier wurden die Zeit, die einzelnen Laststufen, die Vertikalspannung, die Stauchung und die prozentuelle Setzung aufgezeichnet.

Nach dem Ende des Versuches wurden die Proben ausgebaut, im feuchten Zustand gewogen, danach im Ofen bei  $105^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet und danach wiederum gewogen.

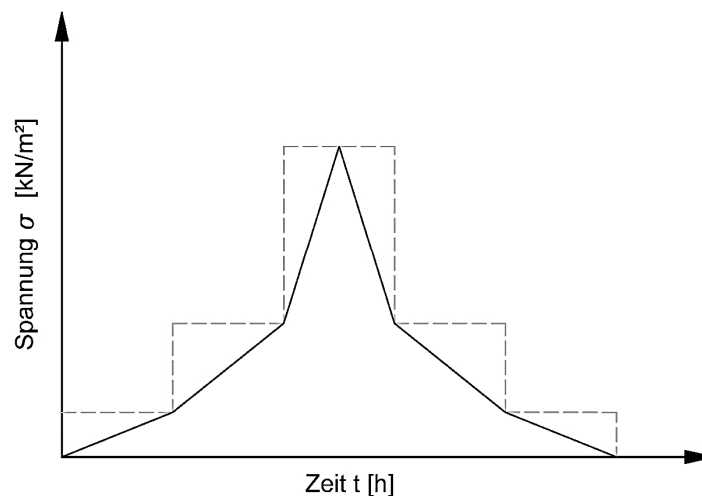
Mit den aufgezeichneten Daten erfolgte die Auswertung ebenfalls im Programm „EBLAB“. Die Auswertungen des Kompressionsversuches basieren auf den in unter Punkt 2.3. beschriebenen theoretischen Grundlagen.

Durch die genaue Aufzeichnung der Daten im Intervall von 6 sec wurde bei diesem Versuch auch das Zeit-Setzungsverhalten genauer betrachtet.

#### 3.4.2.2 CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittswisen, konstanten Belastungsraten

Zusätzlich zu den Standardversuchen nach *ÖNORM B 4420* wurden ML-Versuche mit unterschiedlichen Belastungsraten durchgeführt.

Bei dieser Versuchsreihe wurden die Laststufen, welche beim Standardversuch stufenweise erhöht werden, mit abschnittswisen, jeder Laststufe extra angepassten konstanten Laststeigerung durchgeführt.



*Abbildung 34: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit Nachbildung der Laststufen mit abschnittswisen, konstanten Belastungsraten*

Bevor mit der Laststeigerung begonnen wurde, wurden auch hier die Proben 24 Stunden lang mit 5 kN/m<sup>2</sup> vorbelastet. Nach diesen 24 Stunden wurde erst der Kompressionsversuch gestartet.

In nachstehender Tabelle wird der genaue Verlauf der Belastung des CRL-Versuches dargestellt:

Laststufe	Dauer	Belastungsart	Spannung
1	24 Stunden	konstante Erhöhung auf	33 kN/m <sup>2</sup>
2	24 Stunden	konstante Erhöhung auf	62 kN/m <sup>2</sup>
3	24 Stunden	konstante Erhöhung auf	118 kN/m <sup>2</sup>
4	24 Stunden	konstante Erhöhung auf	250 kN/m <sup>2</sup>
5	24 Stunden	konstante Entlastung auf	118 kN/m <sup>2</sup>
6	24 Stunden	konstante Entlastung auf	33 kN/m <sup>2</sup>
7	24 Stunden	konstante Entlastung auf	5 kN/m <sup>2</sup>
8	24 Stunden	konstante Erhöhung	33 kN/m <sup>2</sup>
9	24 Stunden	konstante Erhöhung	62 kN/m <sup>2</sup>
10	24 Stunden	konstante Erhöhung	118 kN/m <sup>2</sup>
11	24 Stunden	konstante Erhöhung	250 kN/m <sup>2</sup>
12	24 Stunden	konstante Erhöhung	496 kN/m <sup>2</sup>
13	24 Stunden	Wasserzugabe	496 kN/m <sup>2</sup>
14	24 Stunden	konstante Entlastung auf	250 kN/m <sup>2</sup>
15	24 Stunden	konstante Entlastung auf	118 kN/m <sup>2</sup>
16	24 Stunden	konstante Entlastung auf	33 kN/m <sup>2</sup>
17	24 Stunden	konstante Entlastung auf	5 kN/m <sup>2</sup>

*Tabelle 7: Versuchsablauf des CRL-Versuches mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittsweiser, konstanter Belastungsrate*

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte vollautomatisch mit einem Messintervall von 6 sec. Die genaue Steuerung der Versuche erfolgte mittels einer vorprogrammierten Prüfvorschrift, in welcher unter anderem auch die aufzuzeichnenden Parameter festgelegt wurden. Hier wurden die Zeit, die einzelnen Laststufen, die Vertikalspannung, die Stauchung und die prozentuelle Setzung aufgezeichnet.

Nach dem Ende des Versuches wurden die Proben ausgebaut, im feuchten Zustand gewogen, danach im Ofen bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und danach wiederum gewogen.

Mit den aufgezeichneten Daten erfolgte die Auswertung ebenfalls im Programm „EBLAB“. Die Auswertungen des Kompressionsversuches basieren auf den in unter Punkt 2.3. beschriebenen theoretischen Grundlagen.

Durch die genaue Aufzeichnung der Daten im Intervall von 6 sec wurde bei diesem Versuch auch das Zeit-Setzungsverhalten genauer betrachtet.

#### 3.4.2.3 CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten

Mit dieser Versuchsreihe wurde der Standardversuch lediglich mit fünf Laststufen nachgebildet, wobei die Dauer der Versuche jeweils die gleiche war. Hier wurde der Versuch mit fünf unterschiedlichen, der Zeit und der zu erreichenden Spannung angepassten, Belastungsraten durchgeführt.

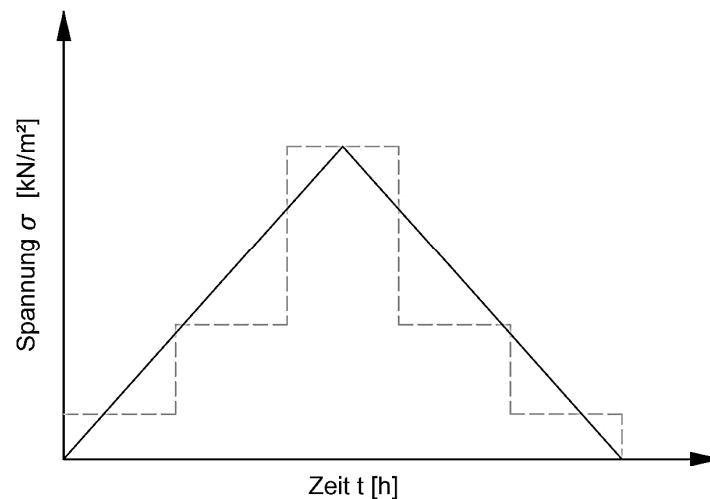


Abbildung 35: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten

Bevor mit der Laststeigerung begonnen wurde, wurden auch hier die Proben 24 Stunden lang mit 5 kN/m<sup>2</sup> vorbelastet. Nach diesen 24 Stunden wurde erst der Kompressionsversuch gestartet.

In nachstehender Tabelle wird der genaue Verlauf der Belastung des CRL-Versuches dargestellt:

Laststufe	Dauer	Belastungsart	Spannung
1	96 Stunden	konstante Belastungsrate auf	250 kN/m <sup>2</sup>
2	72 Stunden	konstante Belastungsrate auf	5 kN/m <sup>2</sup>
3	120 Stunden	konstante Belastungsrate auf	496 kN/m <sup>2</sup>
4	24 Stunden	Wasserzugabe	496 kN/m <sup>2</sup>
5	96 Stunden	konstante Belastungsrate auf	5 kN/m <sup>2</sup>

*Tabelle 8: CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten*

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte auch hier vollautomatisch mit einem Messintervall von 6 sec. Die genaue Steuerung der Versuche erfolgte mittels einer vorprogrammierten Prüfvorschrift, in welcher unter anderem auch die aufzuzeichnenden Parameter festgelegt wurden. Hier wurden die Zeit, die einzelnen Laststufen, die Vertikalspannung, die Stauchung und die prozentuelle Setzung aufgezeichnet.

Nach dem Ende des Versuches wurden die Proben ausgebaut, im feuchten Zustand gewogen, danach im Ofen bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und danach wiederum gewogen.

Mit den aufgezeichneten Daten erfolgte die Auswertung ebenfalls im Programm „EBLAB“. Die Auswertungen des Kompressionsversuches basieren auf den in unter Punkt 2.3. beschriebenen theoretischen Grundlagen.

Durch die genaue Aufzeichnung der Daten im Intervall von 6 sec wurde bei diesem Versuch auch das Zeit-Setzungsverhalten genauer betrachtet.

#### **3.4.2.4 CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h**

Auf Grundlage der Untersuchungen von *Von Fay (1986)* und dessen Richtwerten für Belastungsraten in Abhängigkeit der Fließgrenze des Bodens wurden hier CRL-Versuche mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h durchgeführt. Die 45 kN/m<sup>2</sup>/h ergeben sich durch untenstehendes Diagramm und der durchschnittlichen Fließgrenze des untersuchten Bodens von 42,7%, wobei hier auf die 45 kN/m<sup>2</sup>/h abgerundet wurde.

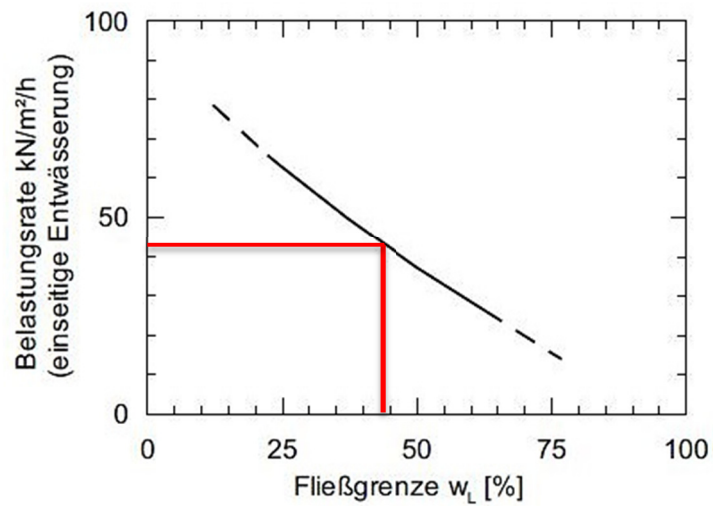


Abbildung 36: Empfohlene Belastungsrate in Abhängigkeit der Fließgrenze nach Von Fay (1986)

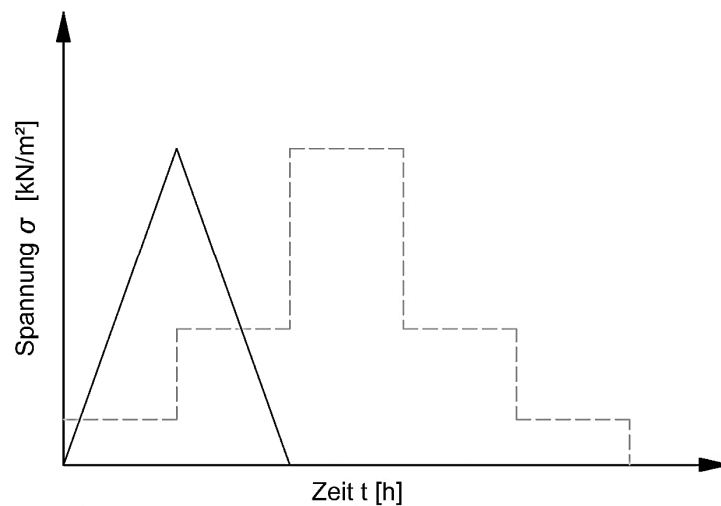


Abbildung 37: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit einer konstanten Belastungsrate von  $45 \text{ kN/m}^2/\text{h}$

Bevor mit der Laststeigerung begonnen wurde, wurden auch hier die Proben 24 Stunden lang mit  $5 \text{ kN/m}^2$  vorbelastet. Nach diesen 24 Stunden wurde erst der Kompressionsversuch gestartet.

Der genaue Versuchsablauf wird in nachstehender Tabelle genau beschrieben:

Laststufe	Dauer	Belastungsart	Spannung
1	5,45 Stunden	konstante Belastungsrate mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h	250 kN/m <sup>2</sup>
2	5,45 Stunden	konstante Belastungsrate mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h	5 kN/m <sup>2</sup>
3	10,9 Stunden	konstante Belastungsrate mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h	496 kN/m <sup>2</sup>
4	24 Stunden	Wasserzugabe	496 kN/m <sup>2</sup>
5	10,9 Stunden	konstante Belastungsrate mit 45 kN/m <sup>2</sup> /h	5 kN/m <sup>2</sup>

*Tabelle 9: CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h*

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte, wie bei allen anderen Versuchen, vollautomatisch mit einem Messintervall von 6 sec. Die genaue Steuerung der Versuche erfolgte mittels einer vorprogrammierten Prüfvorschrift, in welcher unter anderem auch die aufzuzeichnenden Parameter festgelegt wurden. Hier wurden die Zeit, die einzelnen Laststufen, die Vertikalspannung, die Stauchung und die prozentuelle Setzung aufgezeichnet.

Nach dem Ende des Versuches wurden die Proben ausgebaut, im feuchten Zustand gewogen, danach im Ofen bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und danach wiederum gewogen.

Mit den aufgezeichneten Daten erfolgte die Auswertung ebenfalls im Programm „EBLAB“. Die Auswertungen des Kompressionsversuches basieren auf den in unter Punkt 2.3. beschriebenen theoretischen Grundlagen.

Durch die genaue Aufzeichnung der Daten im Intervall von 6 sec wurde bei diesem Versuch auch das Zeit-Setzungsverhalten genauer betrachtet.

#### **3.4.2.5 CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h**

Um für die unter Punkt 3.4.2.5 durchgeführten Versuche, Vergleichsuntersuchungen zu haben, wurden in dieser Versuchsreihe CRL-Versuche mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h durchgeführt.

Bevor mit der Laststeigerung begonnen wurde, wurden auch hier die Proben 24 Stunden lang mit 5 kN/m<sup>2</sup> vorbelastet. Nach diesen 24 Stunden wurde erst der Kompressionsversuch gestartet.



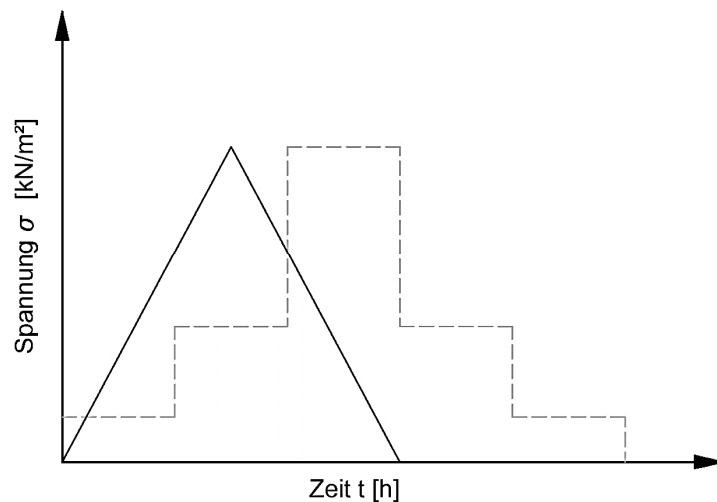


Abbildung 38: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit einer konstanten Belastungsrate von  $22,5 \text{ kN/m}^2/\text{h}$

In nachstehender Tabelle wird der genaue Verlauf der Belastung des CRL-Versuches dargestellt:

Laststufe	Dauer	Belastungsart	Spannung
1	10,9 Stunden	konstante Belastungsrate mit $22,5 \text{ kN/m}^2/\text{h}$	$250 \text{ kN/m}^2$
2	10,9 Stunden	konstante Belastungsrate mit $22,5 \text{ kN/m}^2/\text{h}$	$5 \text{ kN/m}^2$
3	20,8 Stunden	konstante Belastungsrate mit $22,5 \text{ kN/m}^2/\text{h}$	$496 \text{ kN/m}^2$
4	24 Stunden	Wasserzugabe	$496 \text{ kN/m}^2$
5	20,8 Stunden	konstante Belastungsrate mit $22,5 \text{ kN/m}^2/\text{h}$	$5 \text{ kN/m}^2$

Tabelle 10: CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von  $22,5 \text{ kN/m}^2/\text{h}$

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte, wie bei allen anderen Versuchen, vollautomatisch mit einem Messintervall von 6 sec. Die genaue Steuerung der Versuche erfolgte mittels einer vorprogrammierten Prüfvorschrift, in welcher unter anderem auch die aufzuzeichnenden Parameter festgelegt wurden. Hier wurden die Zeit, die einzelnen Laststufen, die Vertikalspannung, die Stauchung und die prozentuelle Setzung aufgezeichnet.

Nach dem Ende des Versuches wurden die Proben ausgebaut, im feuchten Zustand gewogen, danach im Ofen bei  $105^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet und danach wiederum gewogen.

### 3 Laborversuche zum Spannungs-Verformungsverhalten

---

Mit den aufgezeichneten Daten erfolgte die Auswertung ebenfalls im Programm „EBLAB“, Die Auswertungen des Kompressionsversuches basieren auf den in unter Punkt 2.3. beschriebenen theoretischen Grundlagen.

Durch die genaue Aufzeichnung der Daten im Intervall von 6 sec wurde bei diesem Versuch auch das Zeit-Setzungsverhalten genauer betrachtet.

## 4. Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

### 4.1 Vergleich der Ergebnisse in den einzelnen Versuchsreihen

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse in den einzelnen Versuchsreihen verglichen, um mögliche Ausreißer bzw. Störungen, welche das Ergebnis beeinflussen können zu erkennen.

Um die Verformungseigenschaften der einzelnen Versuchsreihen beschreiben und vergleichen zu können, wird der Steifemodul in Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannung dargestellt. Zusätzlich wird die Stauchung in einer Druck-Verformungslinie abgebildet.

#### 4.1.1 Standard-Ödometerversuch im mechanischen Kompressionsgerät

##### 4.1.1.1 Steifemodul

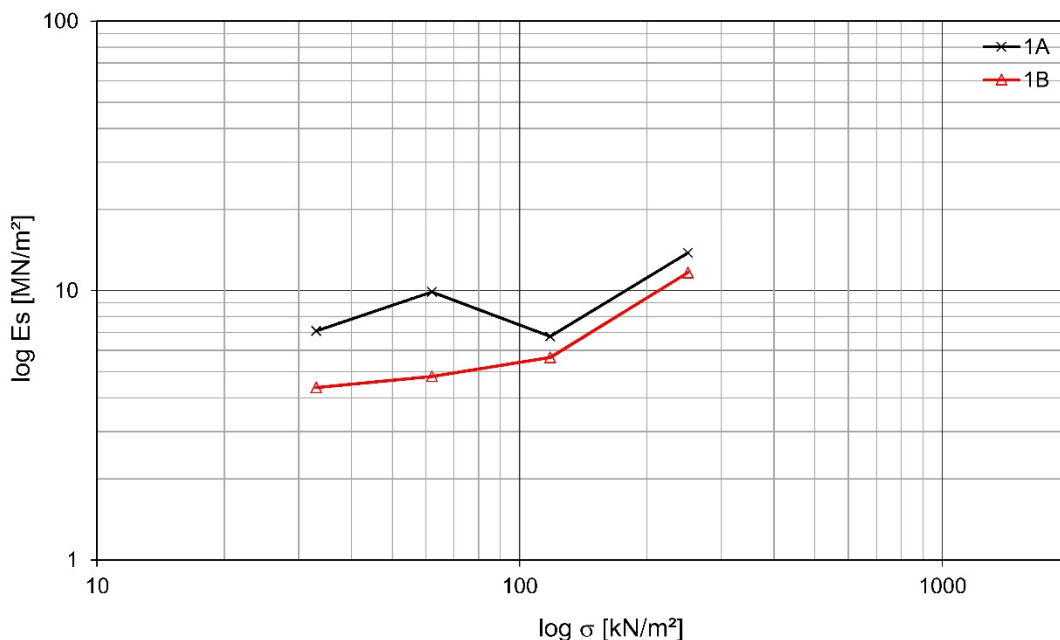


Abbildung 39: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 1)

Erstbelastung				
	1A	1B	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	0,00	0,00	0,00	0,00
33	7,09	4,37	5,73	1,36
62	9,90	4,81	7,35	2,54
118	6,76	5,64	6,20	0,56
250	13,81	11,68	12,75	1,07

Tabelle 11: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 1)

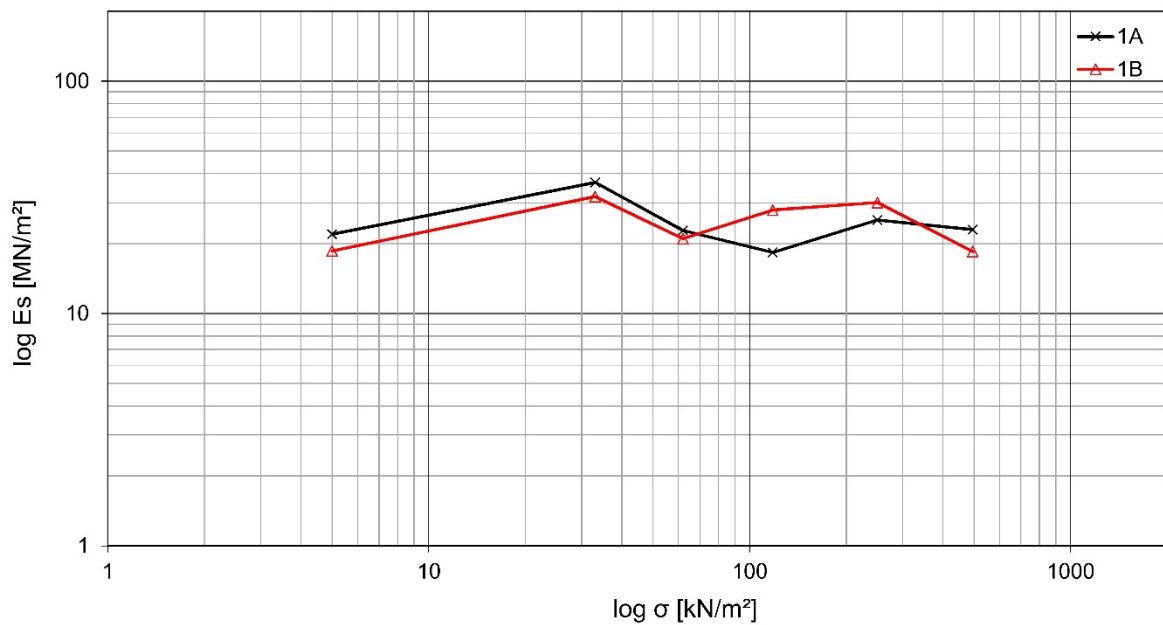


Abbildung 40: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 1)

Wiederbelastung				
	1A	1B	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	21,98	18,58	20,28	1,70
33	36,63	31,85	34,24	2,39
62	22,76	20,99	21,88	0,89
118	18,32	27,87	23,09	4,78
250	25,27	30,03	27,65	2,38
496	22,99	18,48	20,73	2,25

Tabelle 12: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 1)

Bis auf den etwas höheren Steifemodul der Probe 1A bei der Erstbelastung verläuft der Steifemodul bei der Erstbelastung sowie bei der Wiederbelastung relativ gleichmäßig. Die kleine Abweichung am Anfang der Erstbelastung lässt sich auf mögliche Einbaustörungen zurückführen. Trotzdem befindet sich diese Abweichung in einem kleinen Schwankungsbereich und man kann keine wesentlichen Unregelmäßigkeiten und Abweichungen erkennen.

#### 4.1.1.2 Druck-Verformungslinie

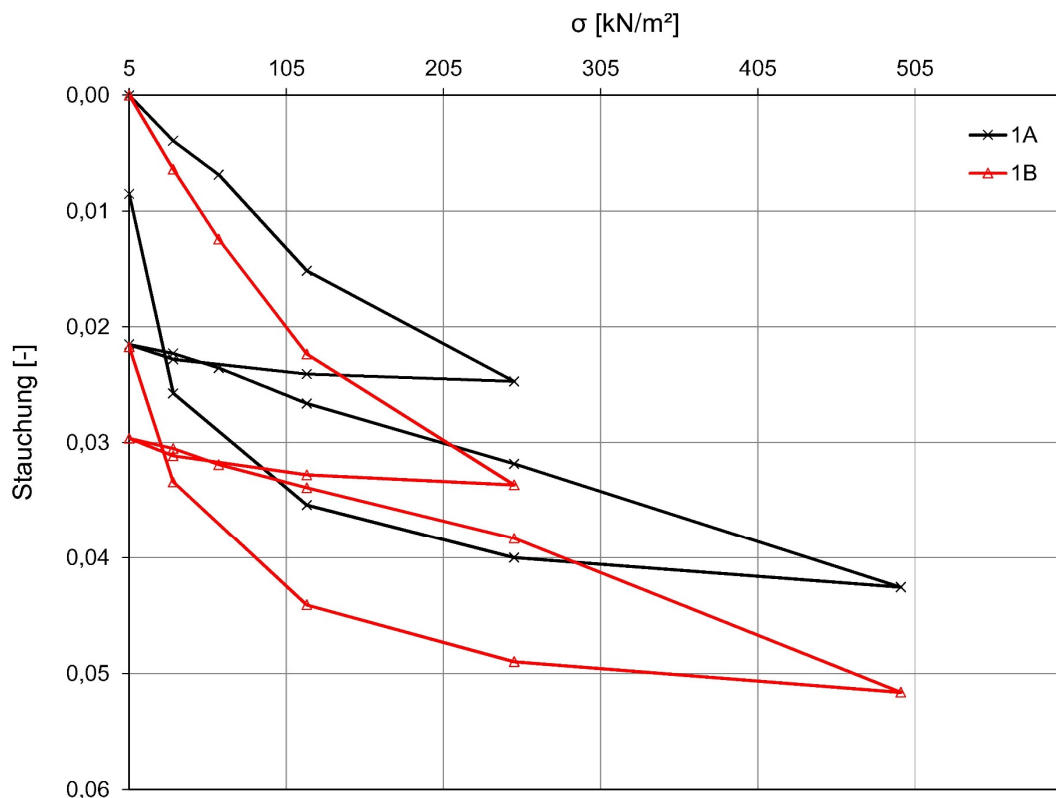


Abbildung 41: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 1)

Auch die Druck-Verformungslinien der beiden Versuche verlaufen gleichmäßig mit geringen Abweichungen der maximalen Verformung in der Wiederbelastungsstufe, welche jedoch vernachlässigbar sind.

## 4.1.2 Standard-Ödometerversuch im vollautomatischen Kompressionsgerät

### 4.1.2.1 Steifemodul

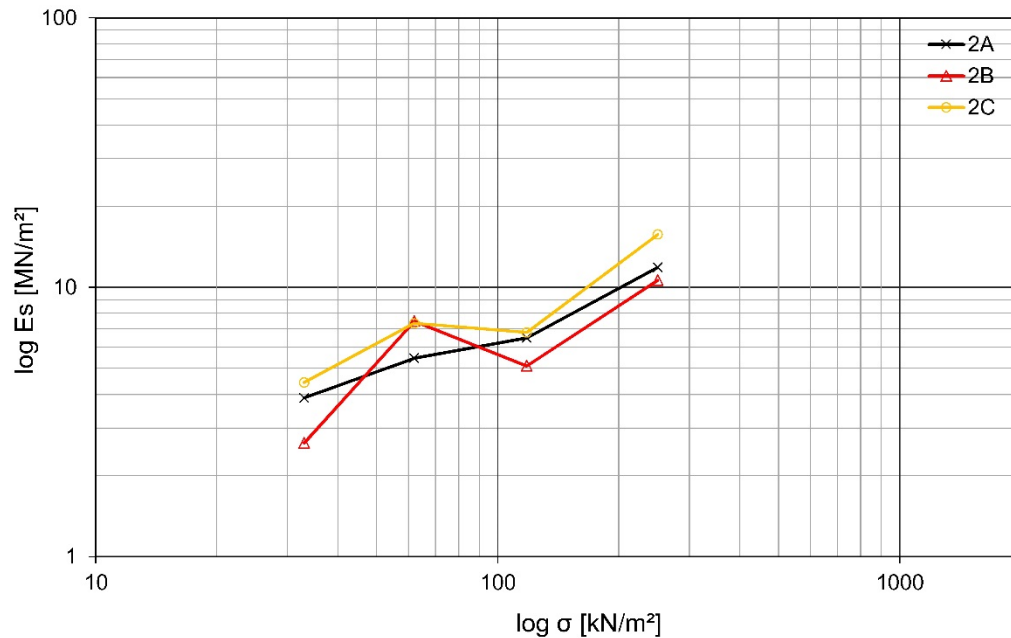


Abbildung 42: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 2)

Erstbelastung					
	2A	2B	2C	MW	SD
σ	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	3,89	2,64	4,44	3,65	0,75
62	5,46	7,48	7,35	6,76	0,92
118	6,49	5,11	6,79	6,13	0,73
250	11,85	10,62	15,70	12,72	2,16

Tabelle 13: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 2)

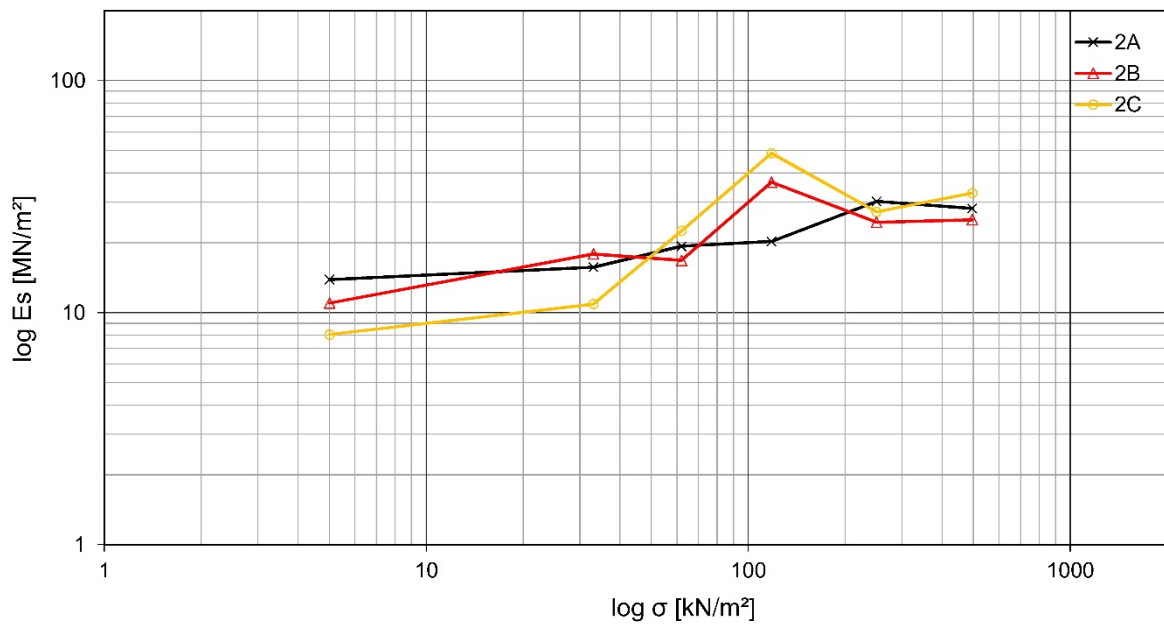


Abbildung 43: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 2)

Wiederbelastung					
	2A	2B	2C	MW	SD
$\sigma$	$E_s$	$E_s$	$E_s$	$E_s$	$E_s$
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	13,89	11,00	8,05	10,98	2,38
33	15,72	17,91	10,89	14,84	2,93
62	19,34	16,81	22,53	19,56	2,34
118	20,26	36,52	48,63	35,14	11,62
250	30,18	24,55	27,21	27,31	2,30
496	28,17	25,16	32,75	28,69	3,12

Tabelle 14: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 2)

In der Versuchsreihe 2, bei welcher der Standard-Ödometerversuch im vollautomatischen Kompressionsgerät durchgeführt wurde, weisen die Verläufe der Steifemoduln bei der Erstbelastung sowie bei der Wiederbelastung keine wesentlichen Unregelmäßigkeiten auf. Die Steifemoduln befinden sich in einem normalen Schwankungsbereich, wobei die geringen Abweichungen vernachlässigbar sind.

### 4.1.2.2 Druck-Verformungslinie

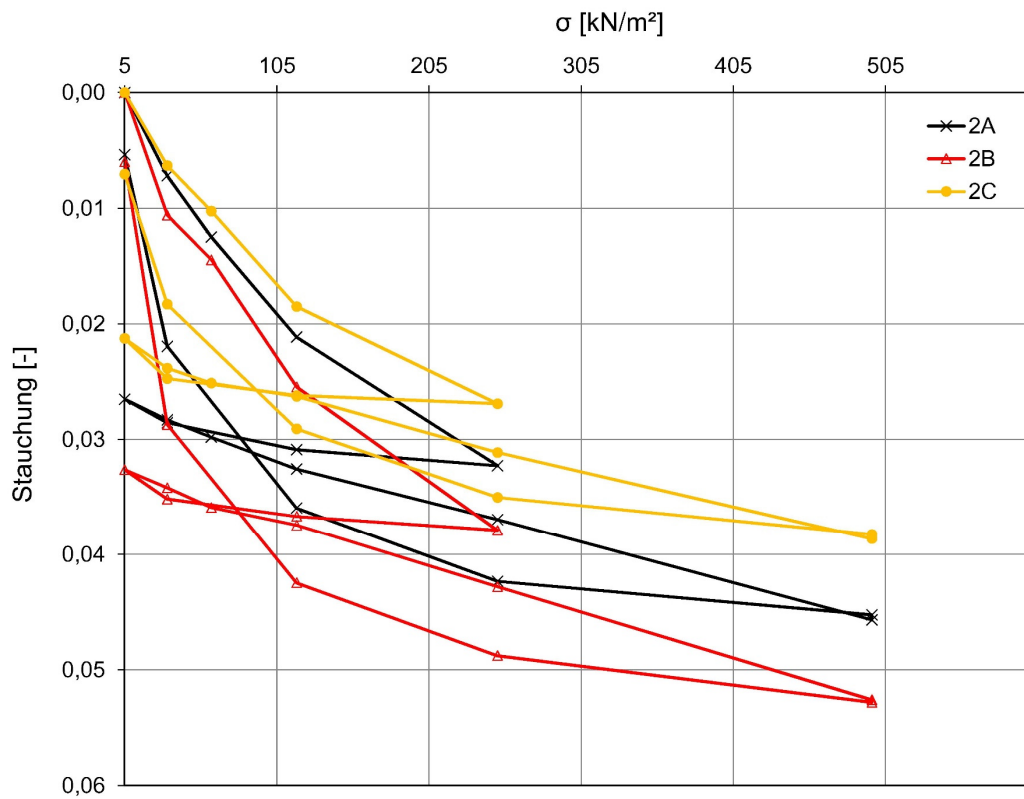


Abbildung 44: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 2)

Die Druck-Verformungslinie verläuft auch bei dieser Versuchsreihe sehr regelmäßig, mit kleinen Unterschieden bei der Maximalverformung in der Wiederbelastungsstufe.



### 4.1.3 CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittswise, konstanten Belastungsraten

#### 4.1.3.1 Steifemodul

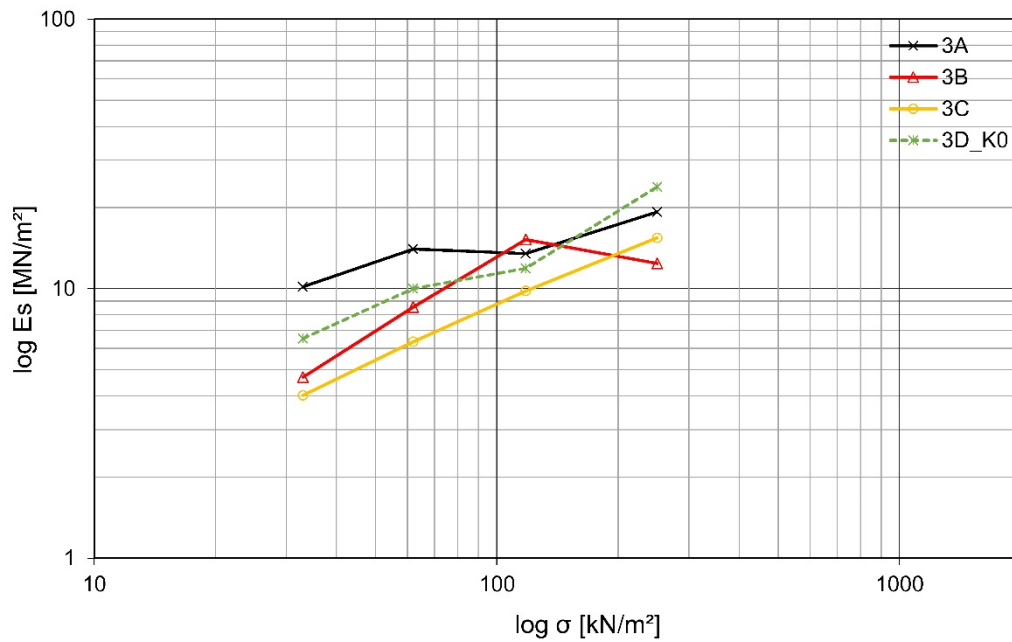


Abbildung 45: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 3)

Erstbelastung						
	3A	3B	3C	3D_K0	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	10,16	4,70	4,02	6,53	6,35	2,38
62	14,03	8,56	6,36	10,00	9,74	2,80
118	13,51	15,22	9,82	11,90	12,61	1,99
250	19,27	12,40	15,44	23,88	17,75	4,30

Tabelle 15: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 3)

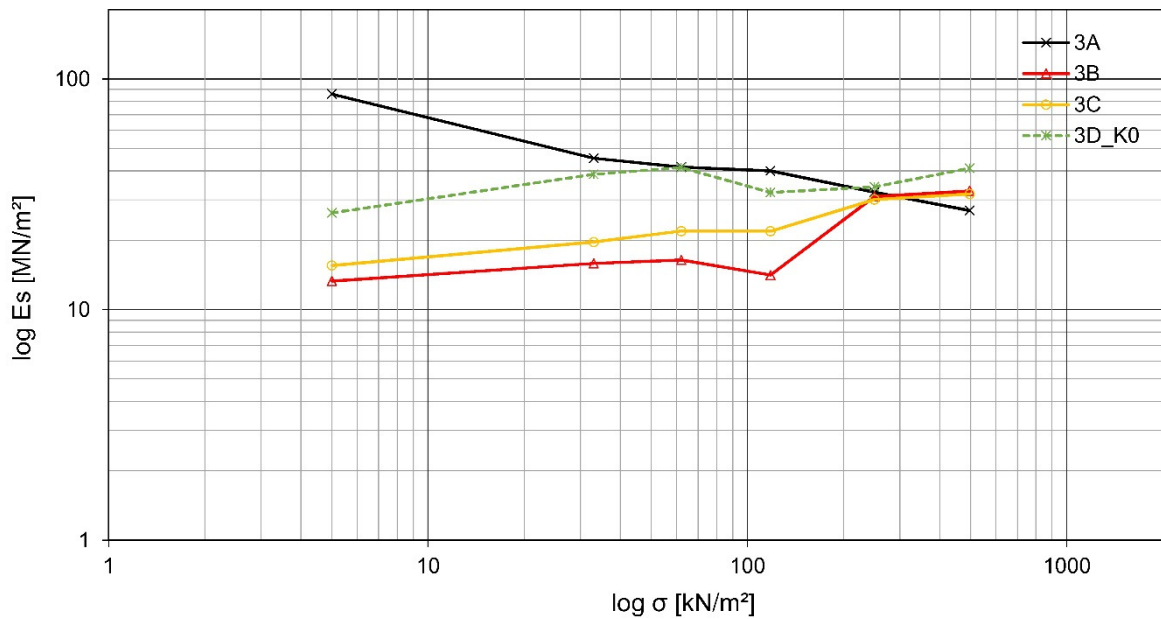


Abbildung 46: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 3)

Wiederbelastung						
	3A	3B	3C	3D_K0	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	86,05	13,30	15,56	26,28	35,30	29,71
33	45,36	15,88	19,66	38,64	29,89	12,42
62	41,58	16,43	21,92	41,33	30,31	11,31
118	40,01	14,13	21,89	32,26	27,07	9,86
250	32,34	30,97	30,06	34,13	31,88	1,54
496	26,36	32,74	31,75	41,07	32,98	5,27

Tabelle 16: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 3)

Bei der Versuchsreihe 3, bei welcher der Standardkompressionsversuch mit abschnittswisen konstanten Belastungsraten nachgebildet wurde, verlaufen die Steifemoduln in der Erstbelastungsstufe sehr regelmäßig, jedoch weist die Probe Nr. 3A bei der Wiederbelastung anfänglich einen fast vierfach größeren Steifemodul als die restlichen drei Versuche auf. Diese Abweichung kann auf mögliche Einbaustörungen zurückgeführt werden.

Bei dieser Versuchsreihe wurde auch ein Versuch mit einer  $K_0$ -Zelle (Probennr. 3D\_K0) unter Aufzeichnung des Seitendruckes durchgeführt. Dieser Versuch wurde nur zum Vergleich, inwieweit die  $K_0$ -Zelle mit den Standard-Ödometerzellen übereinstimmt, durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Versuches fließen nicht in die statistische Auswertung

ein. Trotzdem ist zu erkennen, dass auch dieser Versuch im Vergleich zu den normalen Ödometerzellen keine Abweichungen aufweist.

#### 4.1.3.2 Druck-Verformungslinie

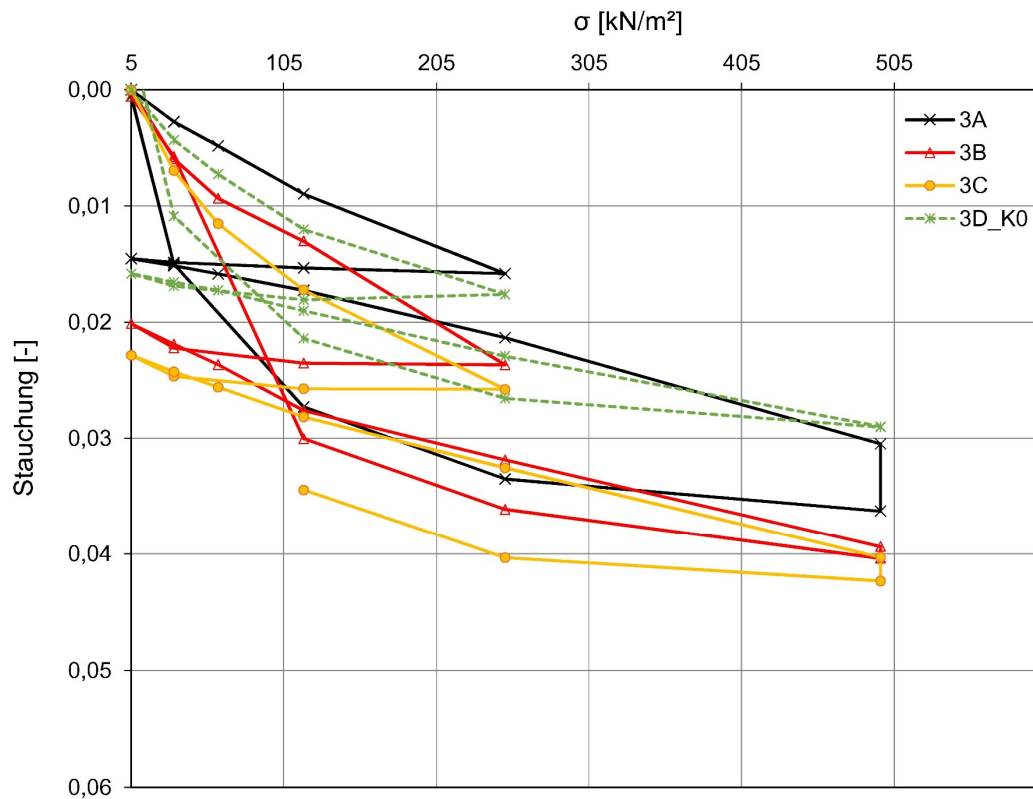


Abbildung 47: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 3)

Bis auf die Probe Nr. 3A verlaufen die Druck-Verformungslinien sehr konstant und gleichmäßig. Probe Nr. 3A verhält sich bei der Wiederbelastung um einiges steifer als die restlichen Proben, was den höheren Steifemodul (siehe Abbildung 3) hervorruft. Auch erfährt diese Probe im Zuge der Wasserzugabe eine deutlich höhere Verformung (Sackung).

### 4.1.4 CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten

#### 4.1.4.1 Steifemodul

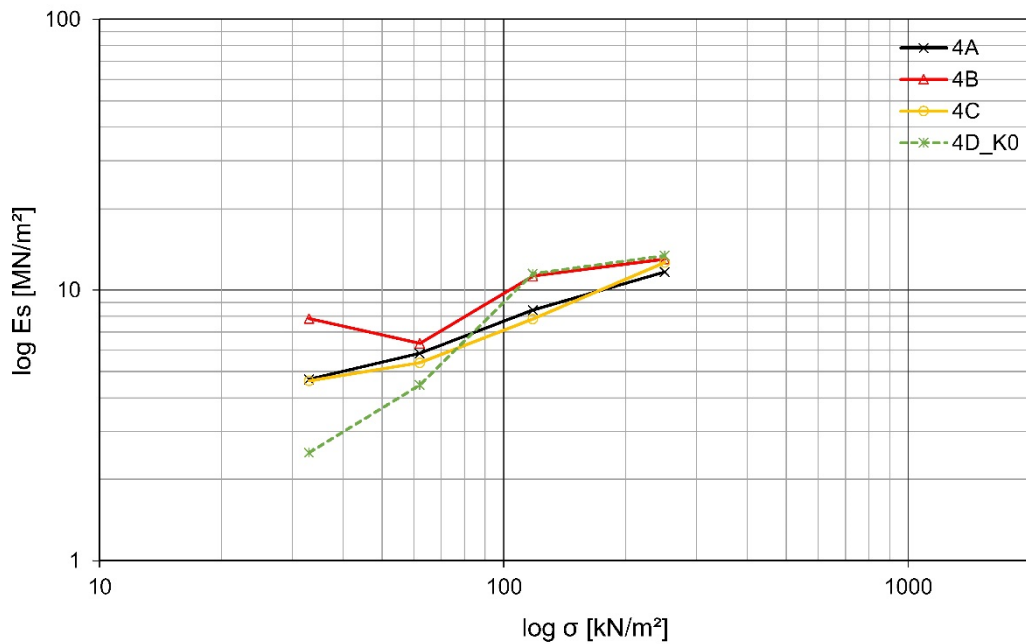


Abbildung 48: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 4)

Erstbelastung						
	4A	4B	4C	4D_K0	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	4,69	7,85	4,63	2,51	4,92	1,91
62	5,84	6,36	5,39	4,47	5,51	0,70
118	8,44	11,26	7,82	11,49	9,75	1,64
250	11,67	13,03	12,65	13,41	12,69	0,65

Tabelle 17: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 4)

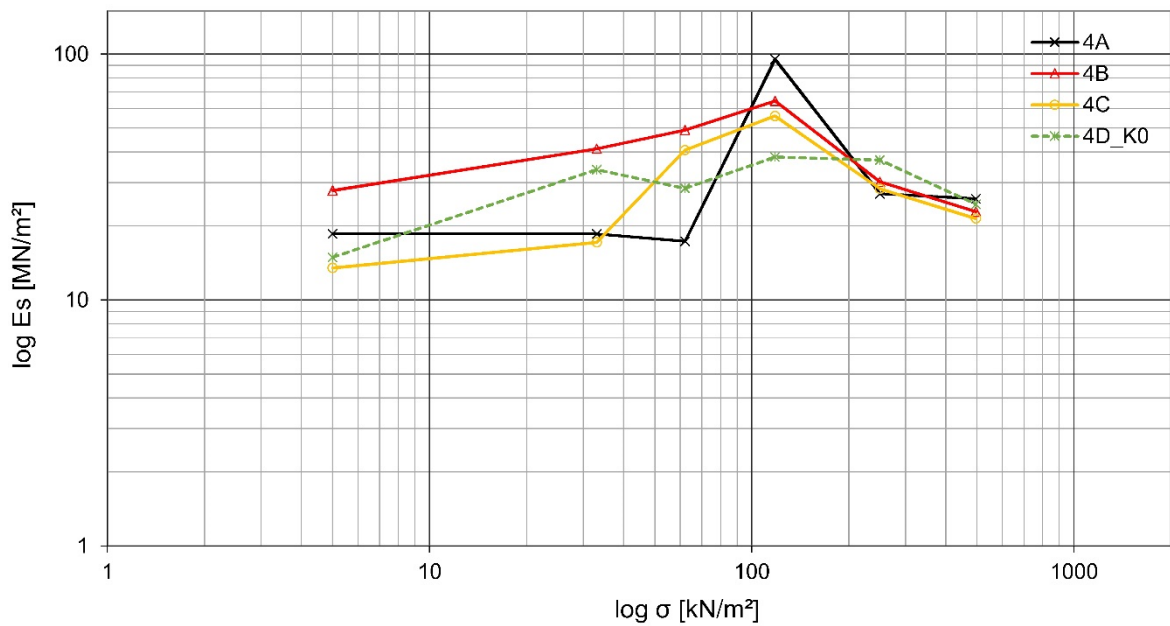


Abbildung 49: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 4)

Wiederbelastung						
	4A	4B	4C	4D_K0	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	18,59	27,87	13,51	14,93	18,72	5,60
33	18,59	41,20	17,17	33,88	27,71	10,18
62	17,34	49,09	40,71	28,46	33,90	12,05
118	95,24	64,52	56,03	38,16	63,49	20,65
250	27,05	30,24	28,33	37,08	30,67	3,87
496	25,83	22,89	21,45	24,53	23,68	1,66

Tabelle 18: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 4)

In der Versuchsreihe 4, bei welcher der gesamte Standardversuch mit einer konstanten Belastungsrate nachgebildet wurde, verlaufen die Steifemoduln bei der Erstbelastung sowie bei der Wiederbelastung sehr regelmäßig und konstant. Lediglich Probe Nr. 4A weist einen Ausreißer bei 118 kN/m<sup>2</sup> der Wiederbelastung auf.

Auch bei dieser Versuchsreihe wurde ein Versuch (Probennr. 4D\_K0) unter Verwendung einer K<sub>0</sub>-Zelle durchgeführt. Dieser Versuch wurde nur zum Vergleich, in wie weit die K<sub>0</sub>-Zelle mit den Standard-Ödometerzellen übereinstimmt, durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Versuches fließen nicht in die statistische Auswertung ein. Der Verlauf der Steifemoduln verläuft hier sehr ähnlich wie der von den restlichen Versuchen.

### 4.1.4.2 Druck-Verformungslinie

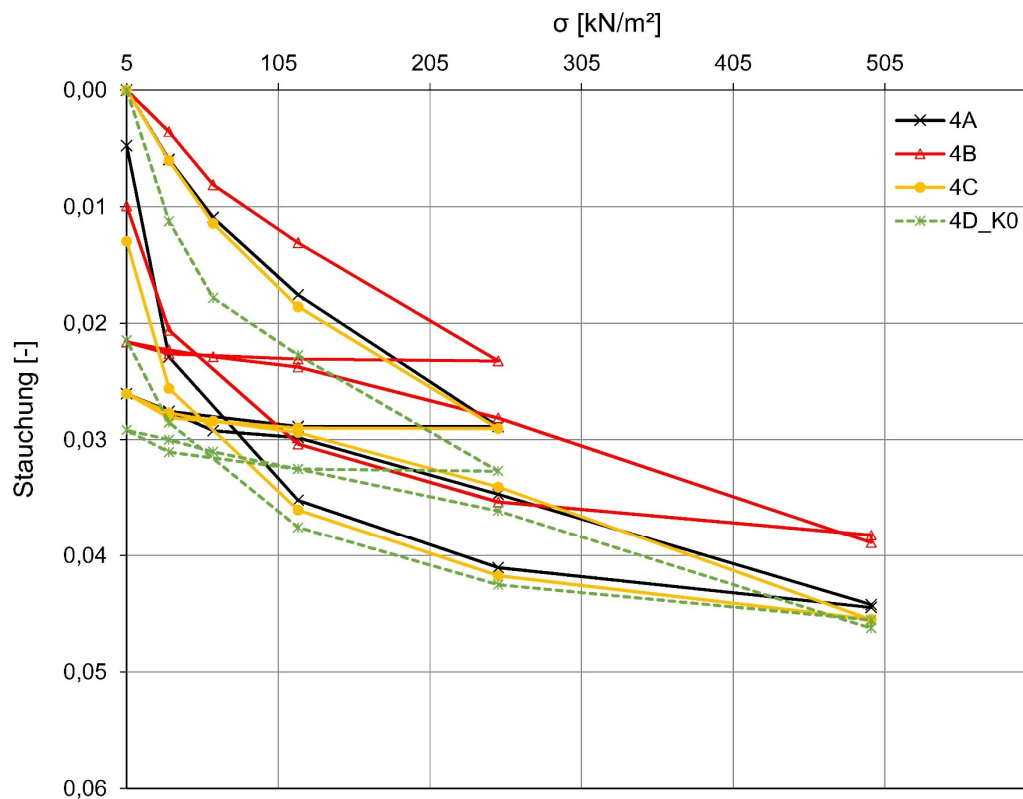


Abbildung 50: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 4)

Die Verläufe der Druck-Verformungslinie sind auch in dieser Versuchsreihe wieder sehr konstant und gleichmäßig. Es ist sehr gut zu erkennen, dass Probe Nr. 4B eine etwas geringere Verformung in der Erstbelastung und in der Wiederbelastung aufweist und sich daraus höhere Steifemoduln ergeben.

### 4.1.5 CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h

#### 4.1.5.1 Steifemodul

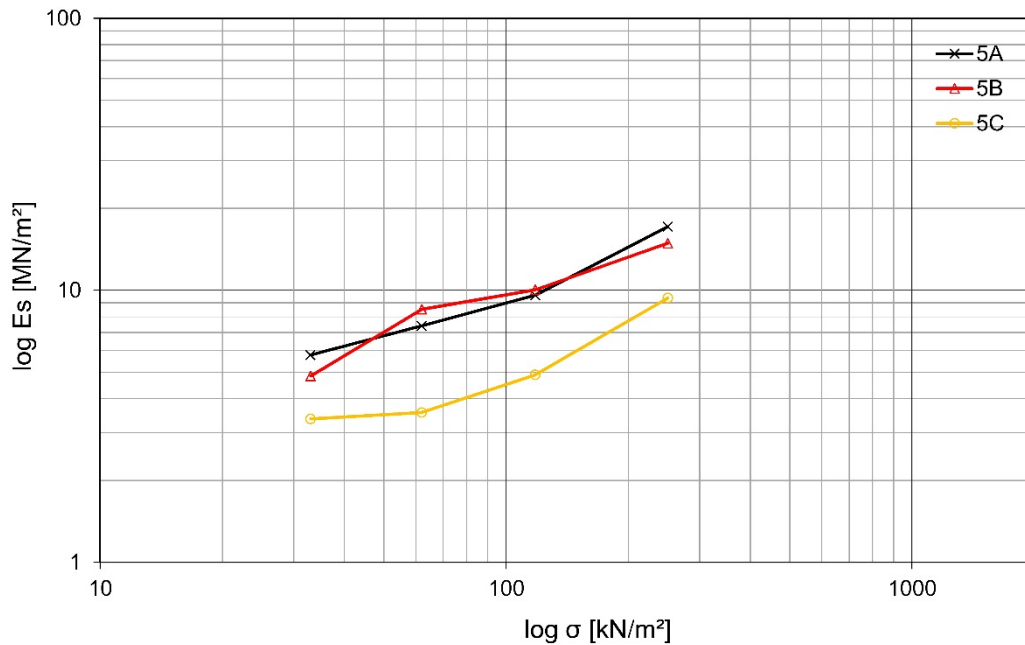


Abbildung 51: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 5)

Erstbelastung					
	5A	5B	5C	MW	SD
σ	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	5,79	4,85	3,37	4,67	1,00
62	7,41	8,51	3,56	6,49	2,12
118	9,60	10,05	4,89	8,18	2,33
250	17,15	14,90	9,37	13,81	3,27

Tabelle 19: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 5)

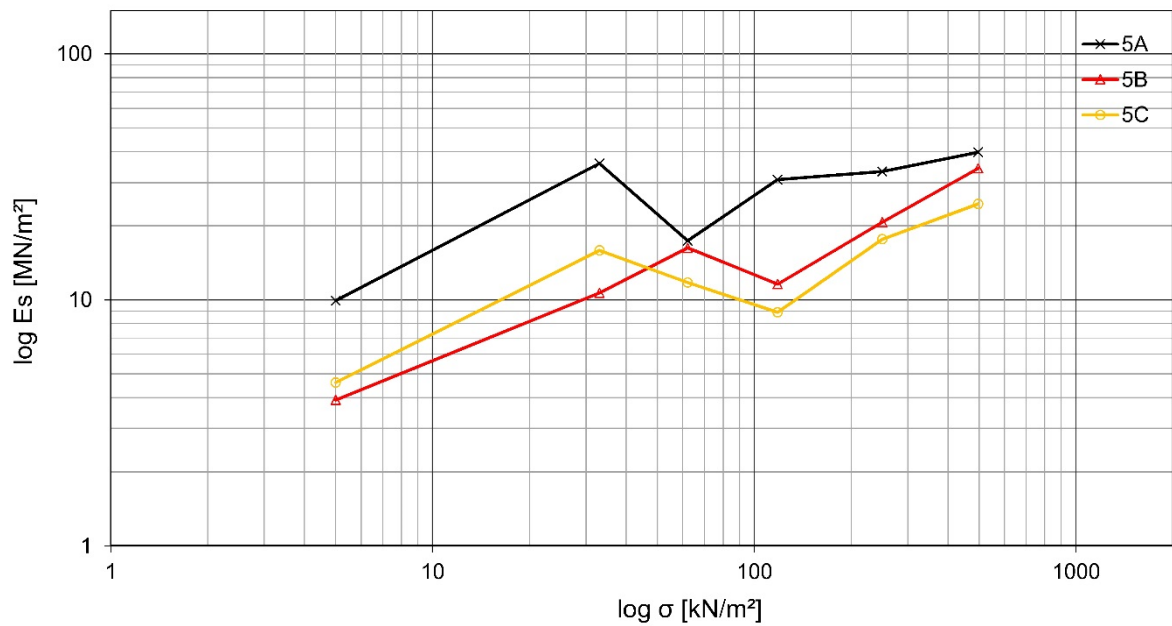


Abbildung 52: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 5)

Wiederbelastung					
	5A	5B	5C	MW	SD
$\sigma$	$E_s$	$E_s$	$E_s$	$E_s$	$E_s$
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
<b>5</b>	9,94	3,91	4,62	6,16	2,69
<b>33</b>	35,91	10,68	15,90	20,83	10,87
<b>62</b>	17,39	16,27	11,76	15,14	2,43
<b>118</b>	30,82	11,59	8,91	17,10	9,76
<b>250</b>	33,32	20,70	17,65	23,89	6,78
<b>496</b>	39,86	34,24	24,56	32,89	6,32

Tabelle 20: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 5)

In Versuchsreihe 5, bei welcher der CRL-Versuch mit einer Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h durchgeführt wurde, weist Probe Nr. 5C bei der Erstbelastung etwas geringere Steifemoduln auf als die zwei anderen Proben. Diese geringen Unterschiede lassen sich auf Abweichungen in der Zusammensetzung der Bodenprobe und auf mögliche Störungen im Einbau zurückführen. Jedoch weist der Verlauf der Steifemoduln bei der Wiederbelastung keine nennenswerten Unregelmäßigkeiten auf.



### 4.1.5.2 Druck-Verformungslinie

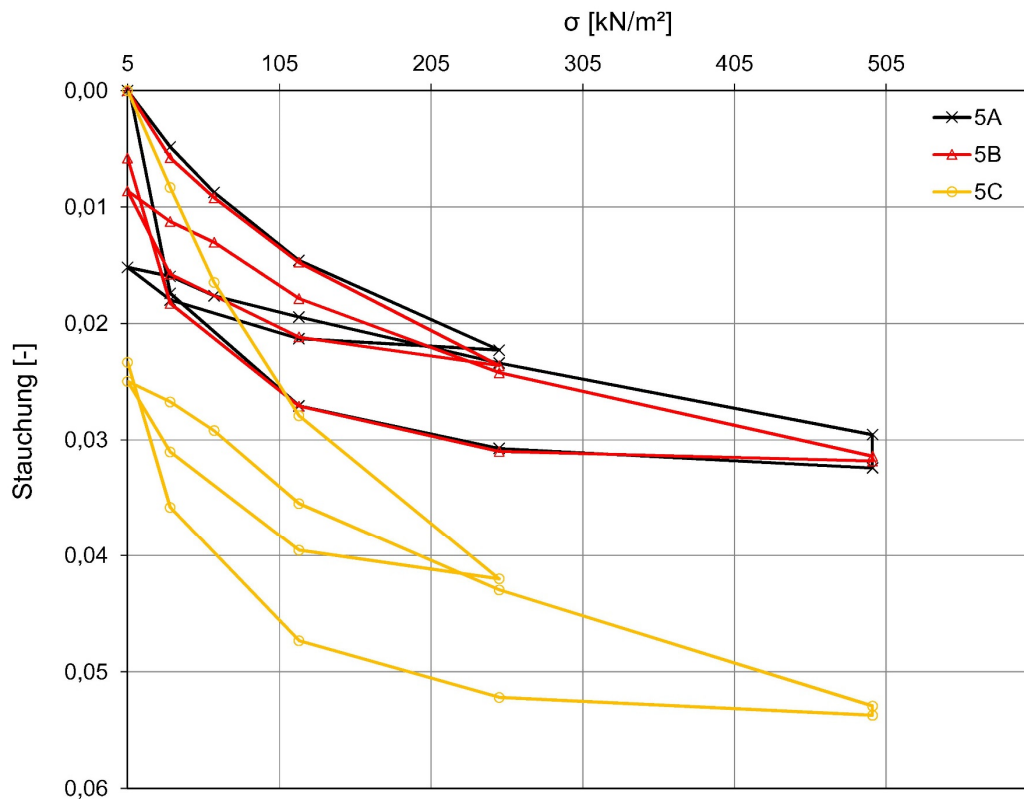


Abbildung 53: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 5)

Auch in der Druck-Verformungslinie ist bei der Probe Nr. 5C deutlich zu erkennen, dass eine größere Verformung stattfindet. Daraus lassen sich die geringen Steifemoduln erklären. Dies kann, wie oben schon erwähnt, durch eine geringe Abweichung der Zusammensetzung der Bodenprobe erklärt werden. Bei Probe Nr. 5A tritt bei Wasserzugabe, im Gegensatz zu den zwei anderen Proben, eine Verformung auf.

#### 4.1.6 CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h

##### 4.1.6.1 Steifemodul

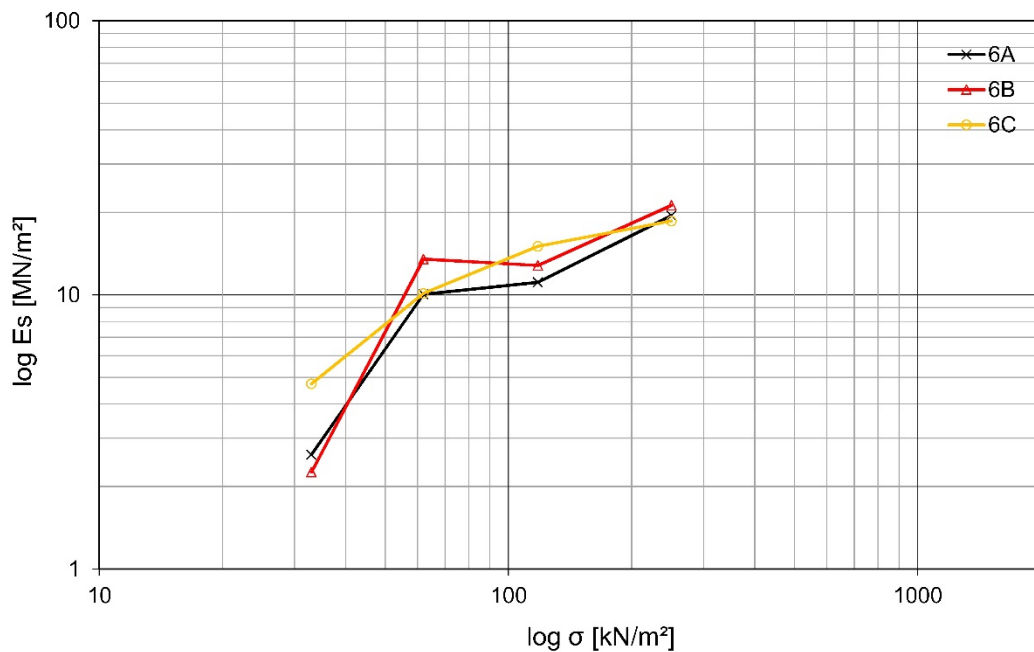


Abbildung 54: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 6)

Erstbelastung					
	6A	6B	6C	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	2,61	2,26	4,74	3,20	1,10
62	10,06	13,51	10,13	11,23	1,61
118	11,12	12,80	15,05	12,99	1,61
250	19,47	21,22	18,61	19,77	1,09

Tabelle 21: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 6)

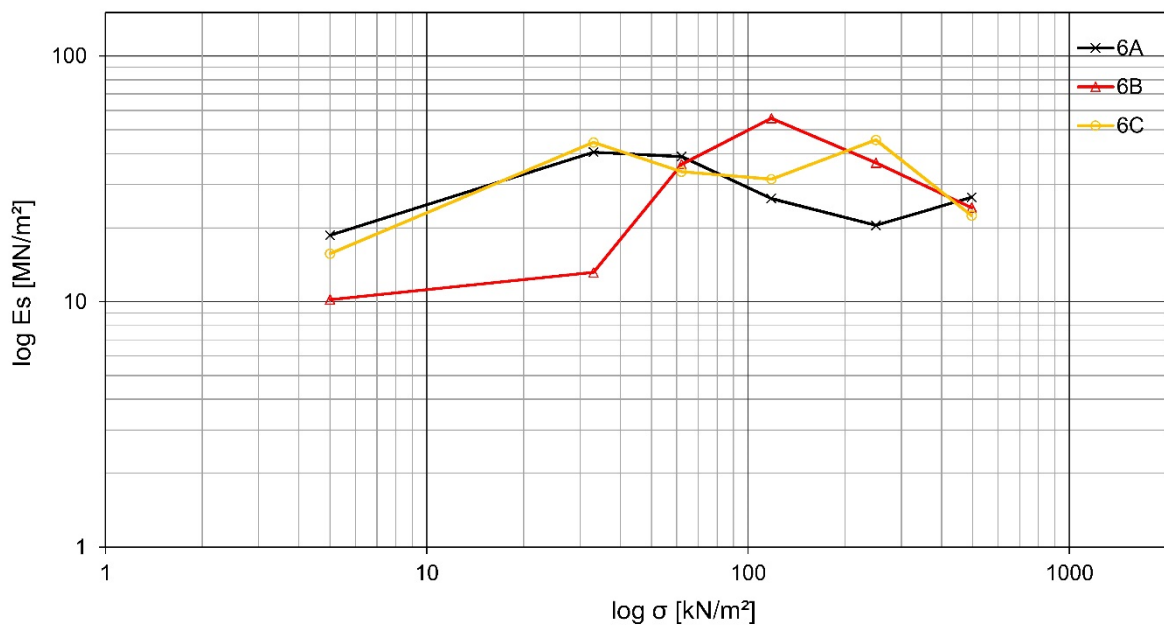


Abbildung 55: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 6)

Wiederbelastung					
	6A	6B	6C	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
5	18,65	10,19	15,67	14,84	3,50
33	40,60	13,15	44,47	32,74	13,94
62	38,98	36,26	33,81	36,35	2,11
118	26,29	55,81	31,51	37,87	12,86
250	20,44	36,76	45,56	34,25	10,41
496	26,61	24,13	22,39	24,38	1,73

Tabelle 22: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 6)

In dieser Versuchsreihe wurde der CRL-Versuch mit einer Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h durchgeführt. Der Verlauf der Steifemoduln bei der Erstbelastung erfolgt sehr konstant, wobei der Sprung von 33 kN/m<sup>2</sup> auf 62 kN/m<sup>2</sup> sehr steil verläuft. Bei der Wiederbelastung der Probe Nr. 6B ist der Steifemodul bei 33 kN/m<sup>2</sup> deutlich geringer als bei den restlichen Proben dieser Versuchsreihe.

### 4.1.6.2 Druck-Verformungslinie

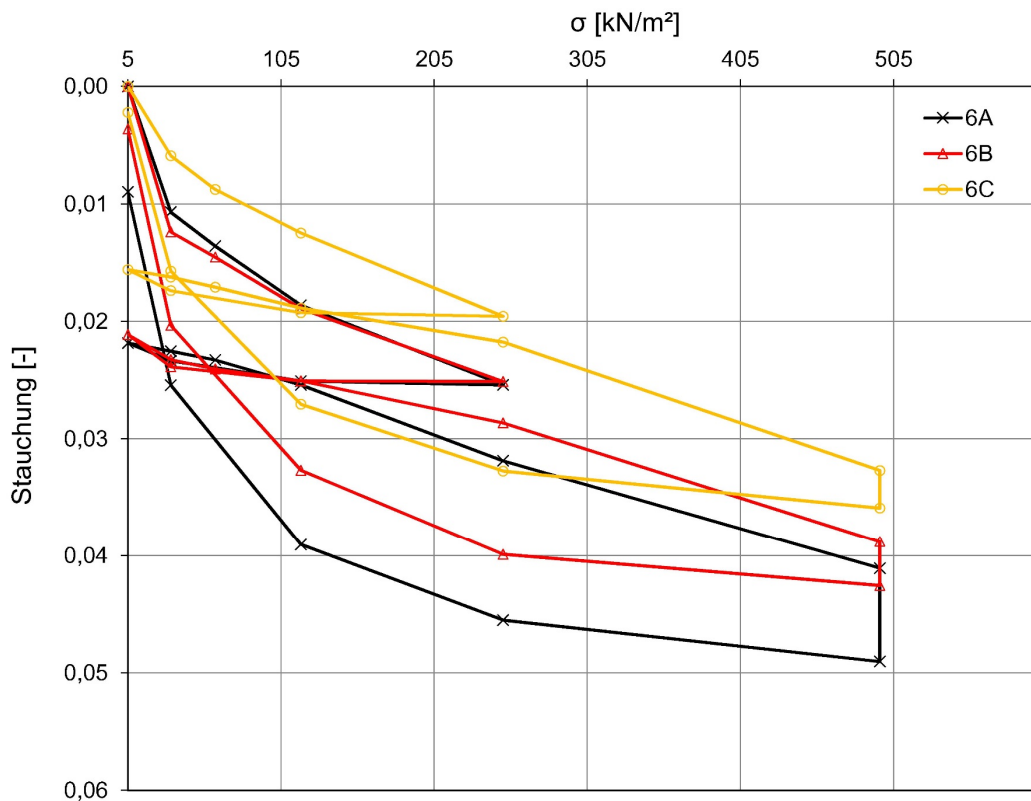


Abbildung 56: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 6)

Die Druck-Verformungslinien verlaufen auch in dieser Versuchsreihe sehr konstant und gleichmäßig. Es tritt eine große Verformung bei allen drei Proben im Zuge der Wasserzugabe auf.

#### 4.1.7 Kompressionsbeiwert $C_c$ , Schwellbeiwert $C_s$

Die Auswertung der Kompressionsbeiwerte und der Schwellbeiwerte erfolgte laut *ÖNORM B 4420* wie unter Punkt 2.4.5. beschrieben.

Probennr.	Kompressionsbeiwert $C_v$ [-]	Schwellbeiwert $C_s$ [-]
1A	0,052	0,008
1B	0,063	0,009
2A	0,061	0,010
2B	0,069	0,011
2C	0,046	0,008
3A	0,038	0,005
3B	0,057	0,011
3C	0,046	0,008
3D_K0	0,033	0,005
4A	0,038	0,011
4B	0,054	0,004
4C	0,056	0,005
4D_K0	0,059	0,007
5A	0,040	0,010
5B	0,045	0,011
5C	0,073	0,015
6A	0,035	0,005
6B	0,032	0,005
6C	0,037	0,005

*Tabelle 23: Kompressionsbeiwert und Schwellbeiwert der einzelnen Versuche*

In der oben dargestellten Tabelle ist deutlich erkennbar, dass bis auf die Ergebnisse der Versuchsreihe Nr. 6 sowohl die Kompressionsbeiwerte, als auch die Schwellbeiwerte kaum Unterschiede aufweisen.

#### 4.1.8 Zusammenfassung

Generell kann gesagt werden, dass sich die Proben innerhalb der Versuchsreihen sehr konstant und gleichmäßig verhalten. Es sind keine größeren bzw. ungewöhnlichen Schwankungen im Bereich der Steifemoduln und im Bereich der Druck-Verformungslinie zu bemerken.

## 4.2 Gegenüberstellung der Vergleichsreihen

### 4.2.1 Steifemodul

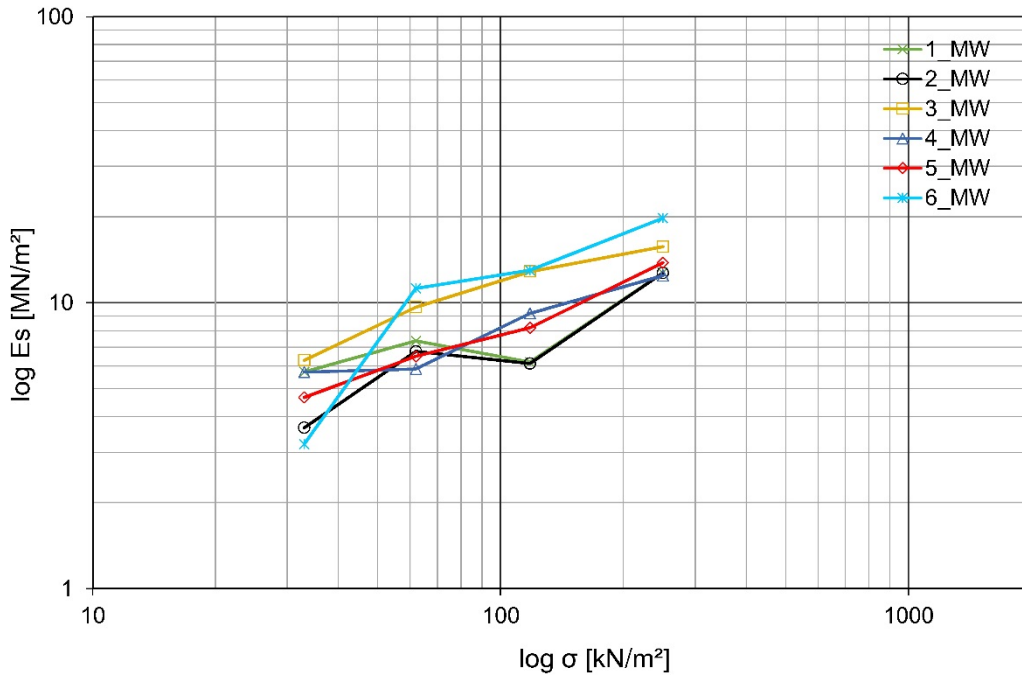


Abbildung 57: Mittelwert der Steifemoduln der Erstbelastung der einzelnen Versuchsreihen

Erstbelastung								
	1_MW	2_MW	3_MW	4_MW	5_MW	6_MW	MW	SD
σ	Es	Es	Es	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]	[MN/m²]
<b>5</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>33</b>	5,73	3,65	6,29	5,72	4,67	3,20	4,88	1,14
<b>62</b>	7,35	6,76	9,65	5,86	6,49	11,23	7,89	1,91
<b>118</b>	6,20	6,13	12,85	9,18	8,18	12,99	9,26	2,80
<b>250</b>	12,75	12,72	15,70	12,45	14,81	19,77	14,53	2,59

Tabelle 24: Berechnete Mittelwerte der Steifemoduln der einzelnen Versuchsreihen der Erstbelastung

In dem oben angeführten Diagramm und in der dazugehörigen Tabelle sind jeweils die Mittelwerte (MW) der Versuchsreihen der Steifemoduln der Erstbelastung angeführt. Es ist gut erkennbar, dass sich die Werte in einem relativ kleinen Schwankungsbereich bewegen. Lediglich bei der Versuchsreihe 6 reißt der Steifemodul bei 62 kN/m² etwas aus, was jedoch im Mittel gesehen keine besondere Auswirkung hat.

#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

Bei genauerer Betrachtung ist jedoch erkennbar, dass sich der Verlauf der Steifemoduln der Versuchsreihen voneinander unterscheidet.

1\_MW und 2\_MW verlaufen auf Grund der gleichen Versuchsdurchführung fast ident. Wobei 3\_MW einen etwas höheren Steifemodul aufweist und keinen Abfall bei 118 kN/m<sup>2</sup> erfährt. 4\_MW und 5\_MW verlaufen trotz ihrer völlig unterschiedlichen Belastungsart fast gleich. Lediglich die Proben von 6\_MW verhalten sich beim Verlauf von 33 kN/m<sup>2</sup> auf 62 kN/m<sup>2</sup> ganz anders als der Rest der Proben.

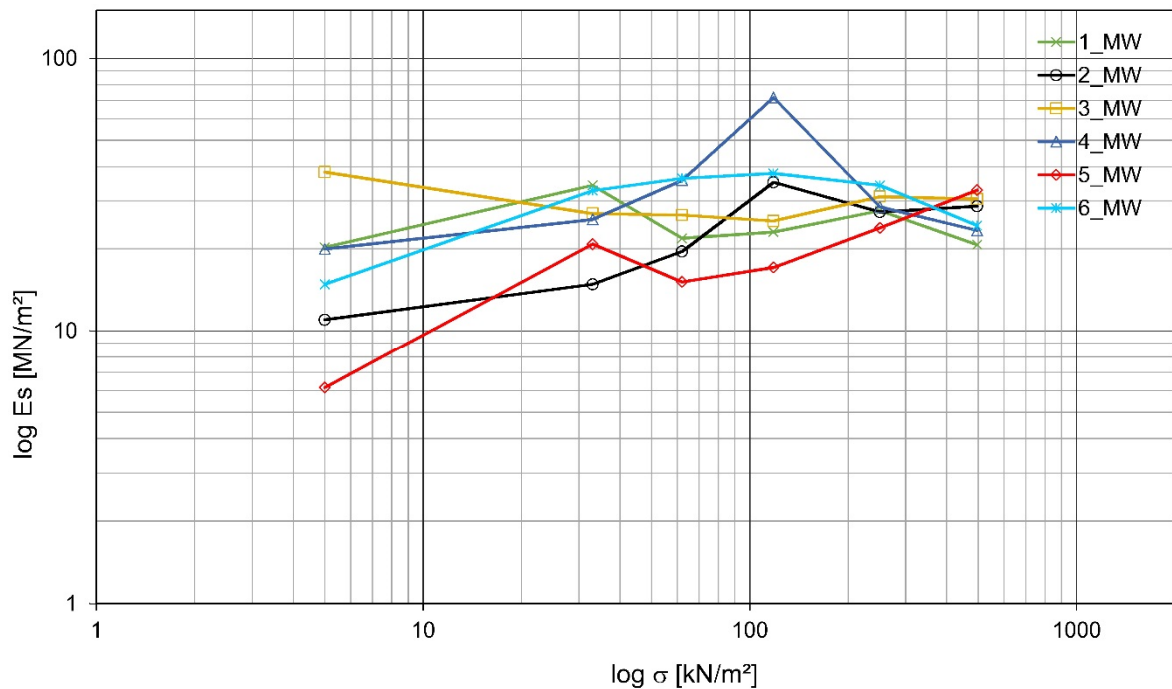


Abbildung 58: Mittelwert der Steifemoduln der Wiederbelastung der einzelnen Versuchsreihen

Wiederbelastung								
	1_MW	2_MW	3_MW	4_MW	5_MW	6_MW	MW	SD
$\sigma$	Es	Es	Es	Es	Es	Es	Es	Es
[kN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
<b>5</b>	20,28	11,77	34,38	18,22	6,39	15,72	14,84	3,50
<b>33</b>	34,24	13,90	28,94	26,72	21,60	34,76	32,74	13,94
<b>62</b>	21,88	20,07	29,34	32,96	15,71	38,41	36,35	2,11
<b>118</b>	23,09	29,16	26,31	62,12	17,71	39,81	37,87	12,86
<b>250</b>	27,65	28,73	31,20	29,65	24,77	36,09	34,25	10,41
<b>496</b>	20,73	29,21	32,34	23,14	34,11	25,76	24,38	1,73

Tabelle 25: Berechnete Mittelwerte der Steifemoduln der einzelnen Versuchsreihen der Wiederbelastung

In Abbildung 58 und in der dazugehörigen Tabelle 25 sind jeweils die Mittelwerte (MW) der Versuchsreihen der Steifemoduln der Wiederbelastung angeführt. Es ist gut zu erkennen, dass der Anfangswert bei der Wiederbelastung die größte Schwankungsbreite aufweist. Je höher die Belastung jedoch wird, desto näher kommen sich die Verläufe und die Schwankungsbreite wird deutlich kleiner.

Bis auf den größeren Ausreißer der Versuchsreihe 4\_MW bei einer Belastung von 118 kN/m<sup>2</sup>, befinden sich die Mittelwerte in einem nicht ungewöhnlichen Schwankungsbereich.

Auch hier ist bei genauerer Betrachtung klar erkennbar, dass sich die Verläufe der einzelnen Versuchsreihen deutlich voneinander unterscheiden.

Trotz der gleichen Belastungsart von 1\_MW und 2\_MW sind die Verläufe im Gegensatz zur Erstbelastung unterschiedlich. Dafür weisen 1\_MW und 5\_WM trotz ihrer doch so unterschiedlichen Belastungsart einen gleichen Verlauf der Steifemoduln auf. Die Versuchsreihe 6\_MW verläuft harmonisch, ohne größere Zackenbildung wie bei den anderen Versuchsreihen. Auch 3\_MW verläuft ohne erkennbare Ausbrüche bzw. Abweichungen.

Auf Grund dessen, dass hier Mittelwerte miteinander verglichen werden, stellen diese Verläufe nicht die tatsächlichen Verläufe der einzelnen Proben dar. Dennoch kann hier gut gezeigt werden, dass trotz der unterschiedlichen Belastungsarten nur geringe Unterschiede in den Steifemoduln gibt.

Diese Abweichungen, auch wenn diese nur sehr gering sind, lassen sich mit den Werten aus der Tabelle 26 erklären. Trotz großer Bemühungen im Vorfeld Bodenproben mit annähernd gleichmäßiger Zusammensetzung und Konsistenz für die Versuche heranzuziehen, ist erkennbar, dass die Dichten der einzelnen Bodenproben voneinander abweichen. Dies ist vor allem bei den Versuchsreihen Nr. 5 und 6 der Fall; die Proben weisen hier eine höhere Dichte als die restlichen Versuchsreihen auf. Daraus ergeben sich geringere Porenzahlen und dadurch höhere Steifemoduln in den Versuchen.



### 4.2.2 Druck-Porenzahl-Diagramm

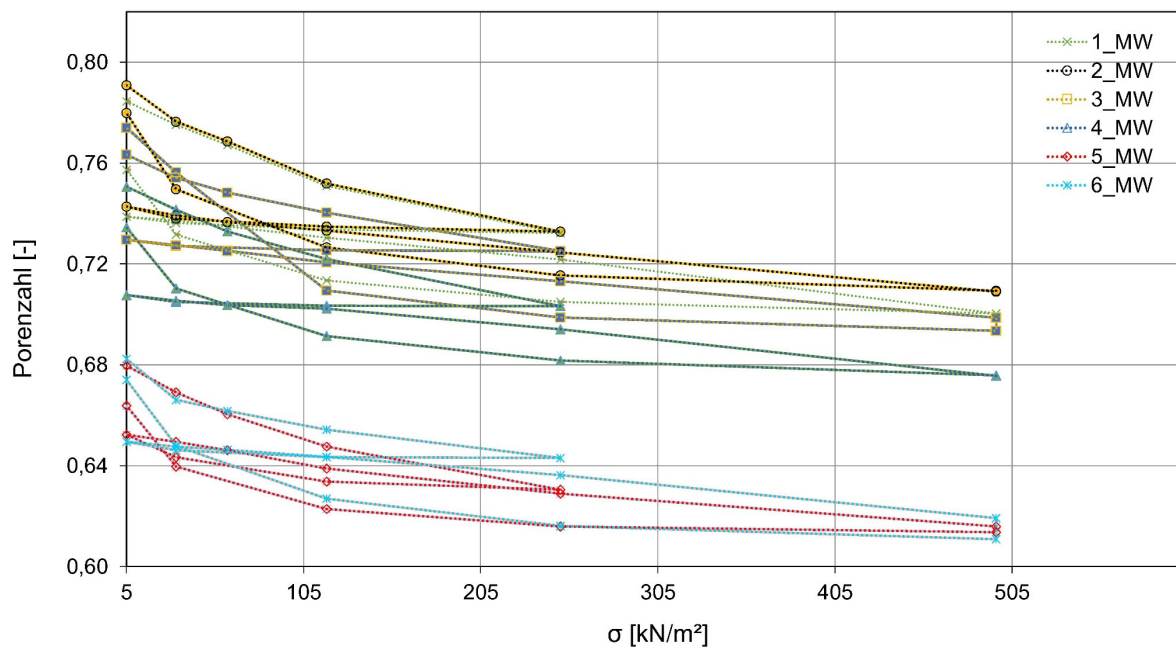


Abbildung 59: Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen

Aus dem Druck-Porenzahl-Diagramm ist gut zu erkennen, dass sich die Verläufe der einzelnen Versuchsreihen kaum voneinander unterscheiden. Der Beginn der Porenzahlen der einzelnen Versuchsreihen befindet sich zwischen 0,78 und 0,64. Die Porenzahl am Ende der Versuche befindet sich zwischen 0,77 und 0,65.

Jedoch unterscheidet sich aus den bereits erwähnten Abweichungen der Dichte und der Porenzahl der Proben der Versuchsreihen Nr. 5 und 6, der Beginn der Druck-Porenzahllinie dieser Versuchsreihen von den restlichen. Trotzdem ist anzumerken, dass diese Abweichungen in einem geringen Schwankungsbereich liegen und kaum Einfluss auf die Repräsentativität der Versuche haben.

#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

Probennr.	vor Versuch		nach Versuch		vor Versuch	nach Versuch	vor Versuch	nach Versuch
	roh,f [g/cm <sup>3</sup> ]	roh,d [g/cm <sup>3</sup> ]	roh, f [g/cm <sup>3</sup> ]	roh,d [g/cm <sup>3</sup> ]	e [-]	e [-]	nat. WG	nat. WG
1A	2,017	1,599	2,041	1,613	0,762	0,747	26,13	26,50
1B	1,972	1,557	2,026	1,591	0,807	0,768	26,67	27,30
2A	1,972	1,557	1,988	1,565	0,778	0,769	26,70	27,02
2B	1,990	1,569	2,017	1,579	0,817	0,807	26,81	27,77
2C	2,010	1,582	2,002	1,593	0,777	0,764	27,07	25,64
3A	1,932	1,526	1,956	1,527	0,819	0,818	26,57	28,05
3B	2,010	1,589	2,016	1,590	0,731	0,730	26,47	26,78
3C	2,018	1,599	2,097	1,657	0,740	0,680	26,14	26,61
3D_K0	1,840	1,432	1,814	1,426	0,916	0,924	28,48	27,20
4A	1,997	1,584	2,010	1,592	0,743	0,734	26,07	26,23
4B	1,992	1,582	2,000	1,598	0,750	0,732	25,96	25,16
4C	1,990	1,579	2,018	1,600	0,760	0,737	26,04	26,16
4D_K0	1,772	1,431	1,846	1,462	0,930	0,889	23,83	26,21
5A	1,960	1,627	2,066	1,626	0,690	0,691	20,43	27,09
5B	1,990	1,652	2,090	1,662	0,664	0,655	20,43	25,76
5C	1,982	1,632	2,117	1,671	0,685	0,645	21,45	26,70
6A	1,982	1,625	2,117	1,639	0,693	0,677	22,02	29,15
6B	2,020	1,657	2,096	1,657	0,659	0,653	21,88	25,99
6C	1,987	1,622	2,093	1,626	0,695	0,692	22,52	28,73
MAX	2,020	1,657	2,117	1,671	0,930	0,924	28,48	29,15
MIN	1,772	1,431	1,814	1,426	0,659	0,645	20,43	25,16
MW	1,970	1,579	2,022	1,593	0,759	0,743	24,82	26,85
SD	0,061	0,060	0,080	0,062	0,074	0,074	2,47	1,01

Tabelle 26: Bodenkennwerte vor und nach dem Versuch

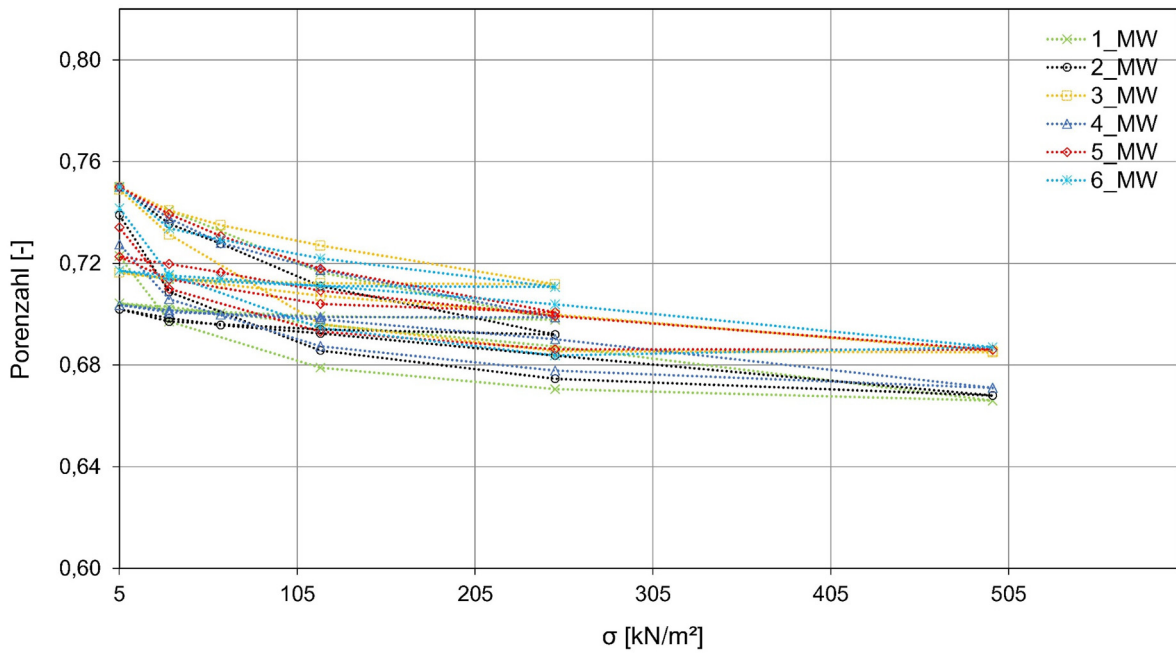


Abbildung 60: Normiertes Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen

Zum besseren Vergleich des Verlaufes der Druck-Porenzahl-Linie wurde in oben dargestelltem Diagramm der Beginn, also die Porenzahl, „normiert“. Trotz der sehr unterschiedlichen Belastungsarten ist ersichtlich, dass der Verlauf von allen Versuchsreihen kaum Unterschiede aufweist.

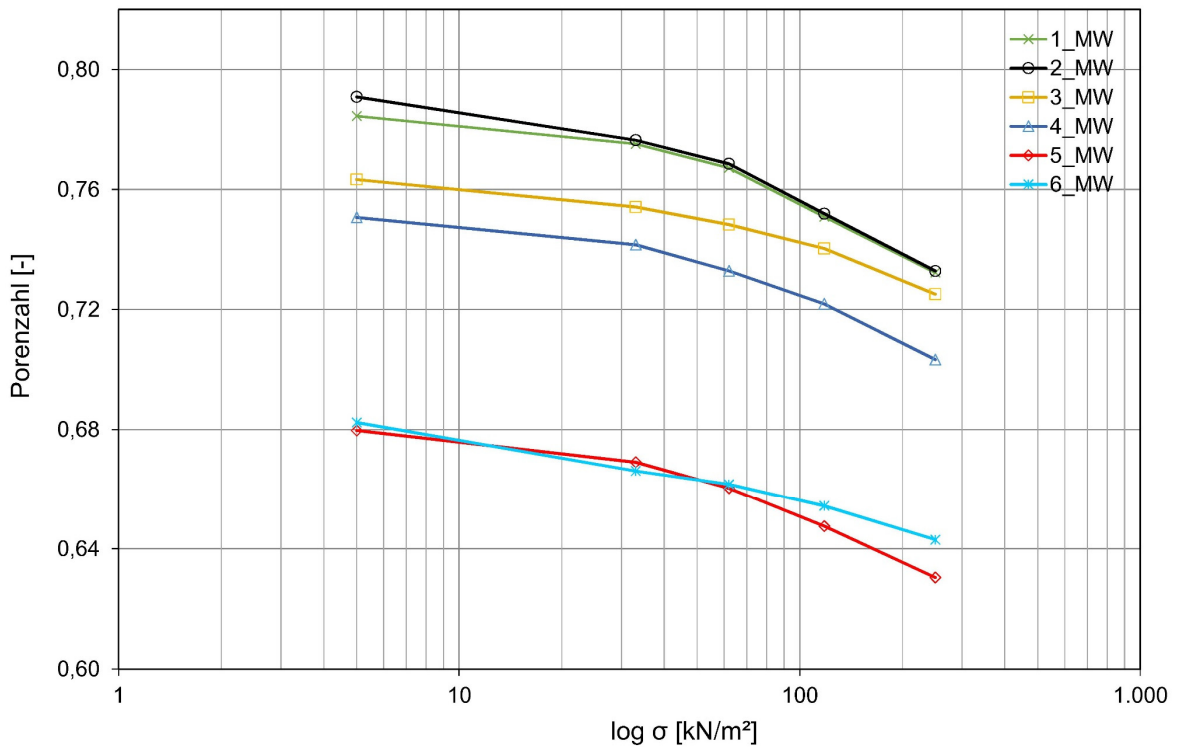


Abbildung 61: Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen bei Erstbelastung

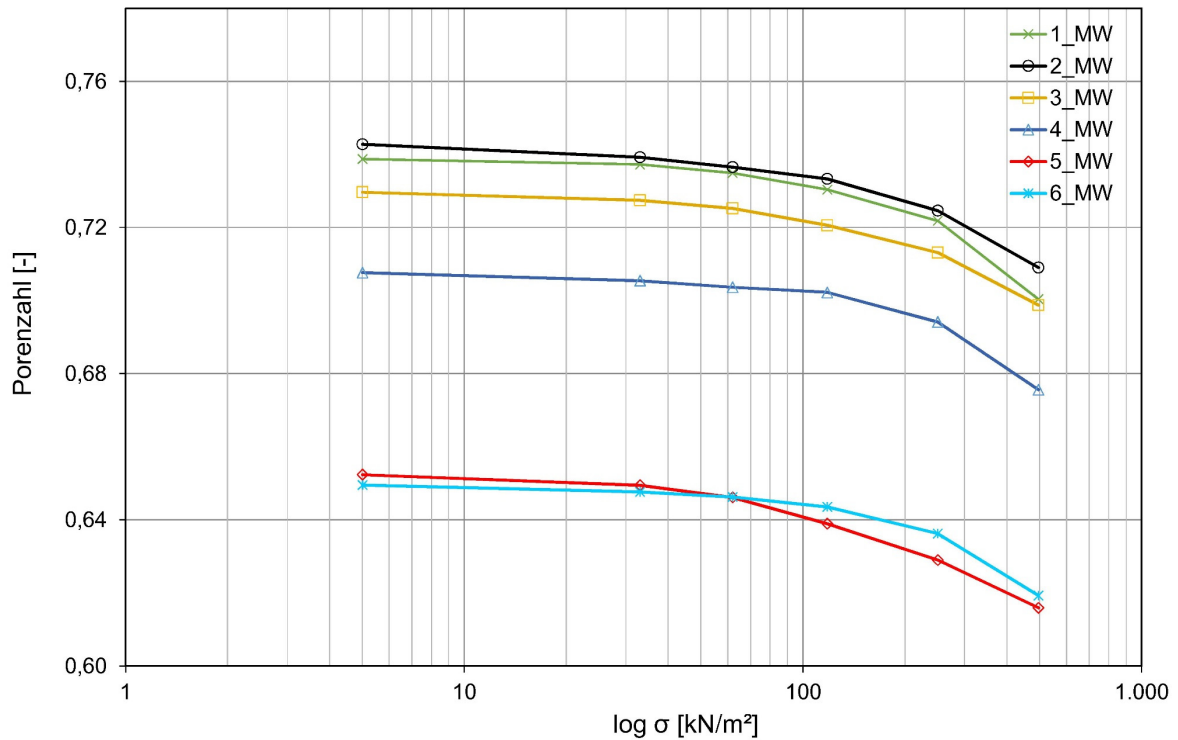


Abbildung 62: Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen bei Wiederbelastung

In den oben dargestellten Druck-Porenzahl-Diagrammen der Mittelwerte für die Erstbelastung und die Wiederbelastung ist erneut klar erkennbar, dass sich die Verläufe der einzelnen Versuchsreihen trotz ihrer doch sehr unterschiedlichen Belastungsraten kaum voneinander unterscheiden. Lediglich die Abweichungen der Porenzahl der Versuchsreihe Nr. 5 und 6 ist erkennbar.

#### 4.2.3 Kompressionsbeiwert $C_c$ , Schwellbeiwert $C_s$

Auch hier erfolgte die Auswertung der Kompressionsbeiwerte und der Schwellbeiwerte laut ÖNORM B 4420.

Probennr.	Kompressionsbeiwert $C_v$ [-]	Schwellbeiwert $C_s$ [-]
1_MW	0,057	0,009
2_MW	0,059	0,010
3_MW	0,043	0,007
4_MW	0,052	0,007
5_MW	0,053	0,012
6_MW	0,035	0,005

Tabelle 27: Mittelwerte der Kompressions- und Schwellbeiwerte

Die Mittelwerte der Kompressions- und Schwellbeiwerte weichen trotz ihrer unterschiedlichen Belastungsarten kaum voneinander ab.

### 4.3 Zusammenfassung

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass sich die Steifemoduln der einzelnen Versuchsreihen kaum voneinander unterscheiden. Bis auf ein paar kleine Abweichungen welche jedoch auf den Mittelwert kaum Einfluss ausüben, befinden sich die Steifemoduln in einem relativ normalen Schwankungsbereich. Und dies, obwohl die Belastungsraten und die Belastungsarten teils stark vom Standard-Ödometerversuch nach *ÖNORM B 4420* abweichen.

Auch in Bezug auf den Verlauf des Druck-Porenzahl-Diagramms sind kaum Unterschiede bemerkbar. Lediglich der Beginn der Druck-Porenzahllinie weicht bei zwei Versuchsreihen auf Grund geringer Unterschiede der Dichte der Bodenproben ab. Jedoch ist auch diese Abweichung sehr gering und hat kaum Einfluss auf die resultierenden Ergebnisse der Kompressionsversuche.

### 4.4 Zeit-Setzungsverhalten der einzelnen Versuchsreihen

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Verlauf der Zeit-Setzungslinien der einzelnen Versuchsreihen, welche im vollautomatischen Kompressionsgerät durchgeführt wurden, verglichen.

Hierfür wurde zu Beginn jeder neuen Laststufe die prozentuelle Stauchung auf null gesetzt, sodass der Verlauf der einzelnen Proben besser vergleichbar ist. Durch das Aufzeichnungsintervall von 6 sec kann das Zeit-Setzungsverhalten über die Länge des gesamten Versuches überwacht werden.

Die Darstellung der Zeit-Setzungslinie erfolgt im logarithmischen Maßstab, da die größte Stauchung zumeist in den ersten Minuten bzw. Sekunden auftritt.

### 4.4.1 Standard-Ödometerversuch im vollautomatischen Kompressionsgerät

#### 4.4.1.1 Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung

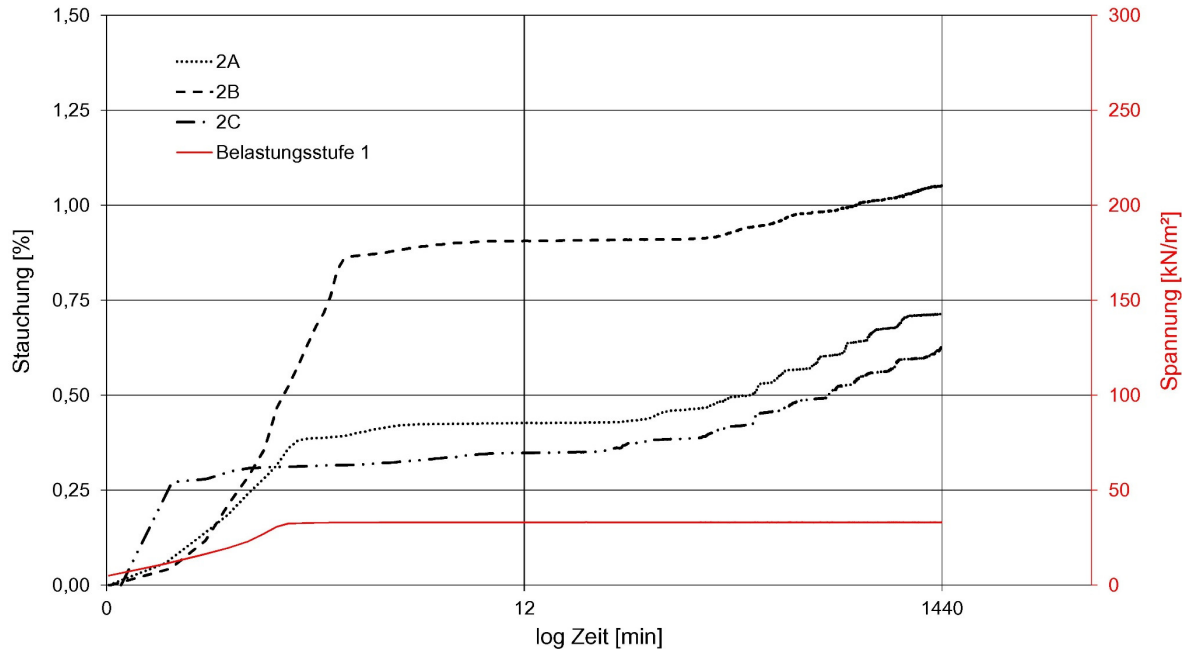


Abbildung 63: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 2)

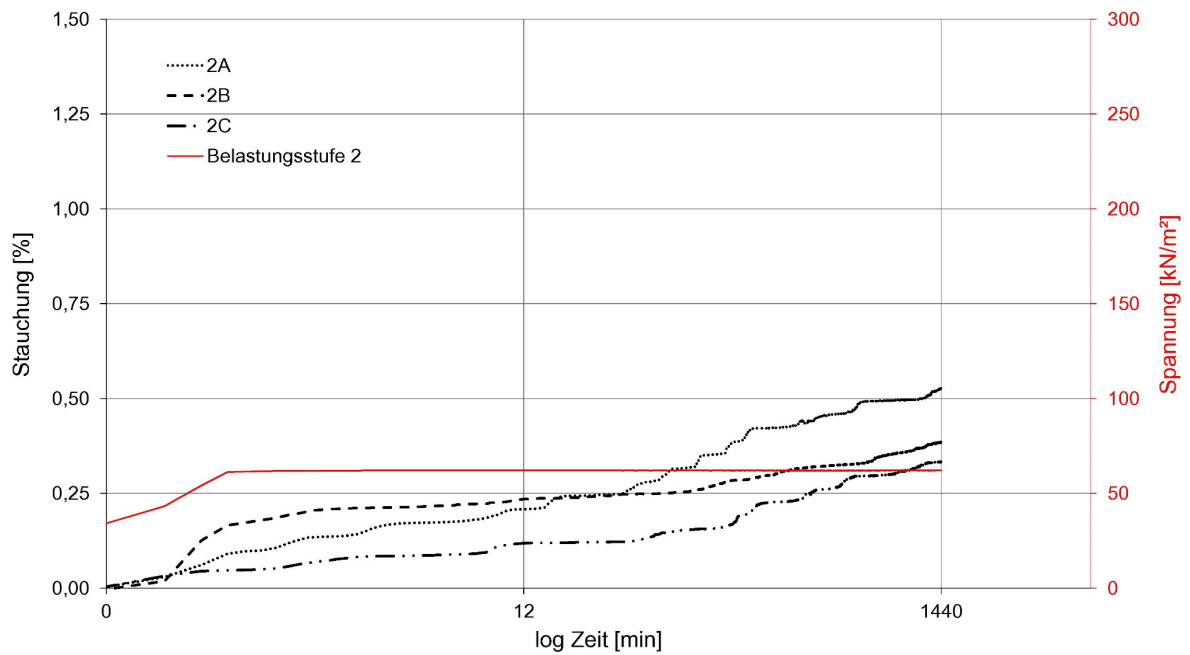


Abbildung 64: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 2 (Versuchsreihe 2)

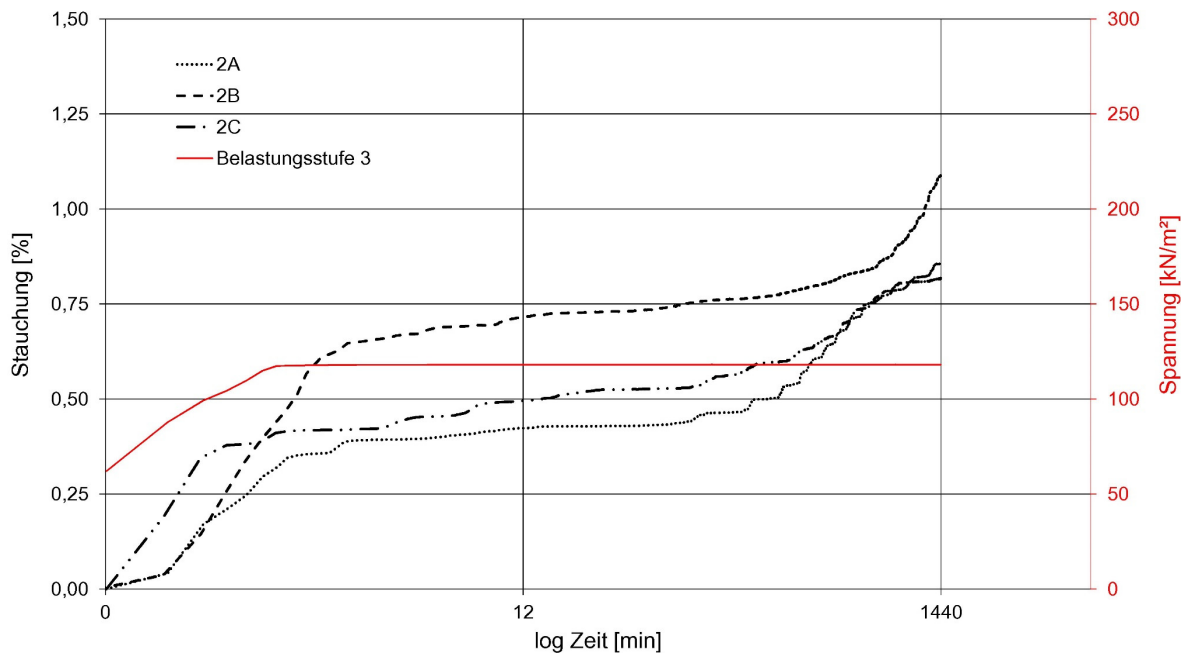


Abbildung 65: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 2)

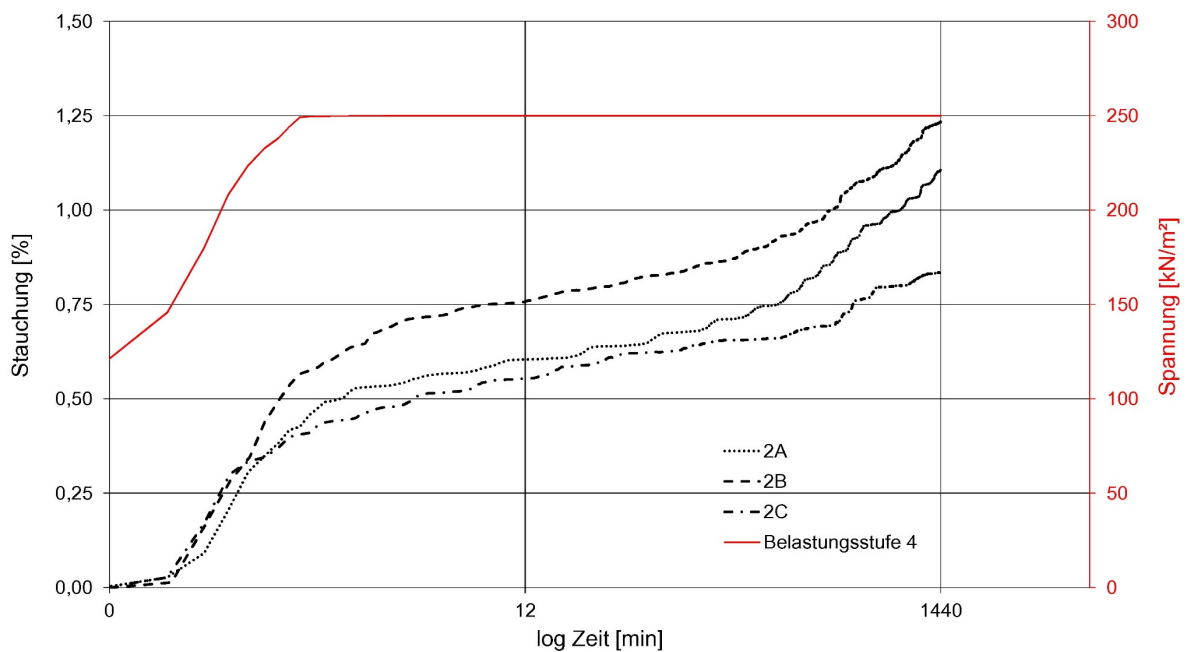


Abbildung 66: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 4 (Versuchsreihe 2)

Die Belastungserhöhung erfolgte in dieser Versuchsreihe stufenweise in Anlehnung an den Standard-Ödometerversuch nach ÖNORM B 4420. Die Lasterhöhung war spätestens nach 10 sec abgeschlossen. Somit ist gut erkennbar, dass ein Teil der größten Verformungen in den ersten Sekunden auftreten.

Das Zeit-Setzungsverhalten dieser Versuchsreihe ist sehr konstant, wobei die drei Anteile der Setzung, welche ein Boden bei Belastungsänderung erfährt, gut erkennbar sind.

Innerhalb der Laststeigerung erfolgt die Sofortsetzung, anschließend die Primärsetzung und am Ende des Versuches die Sekundärsetzung bzw. das Kriechen.

#### 4.4.1.2 Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung

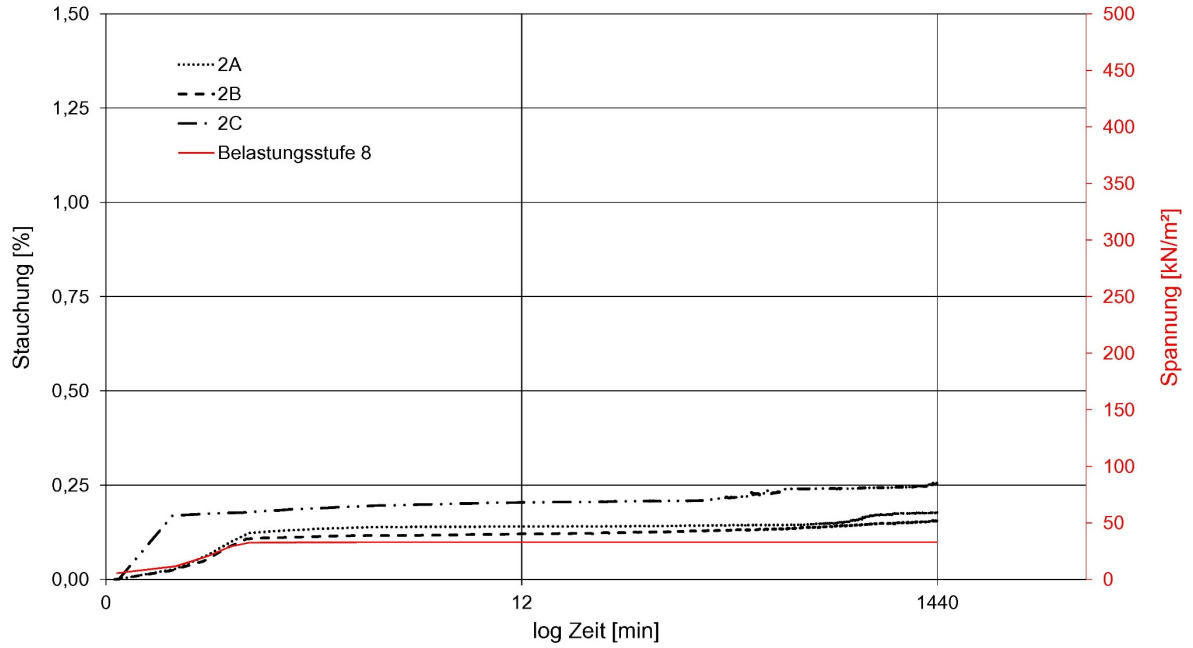


Abbildung 67: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 8 (Versuchsreihe 2)

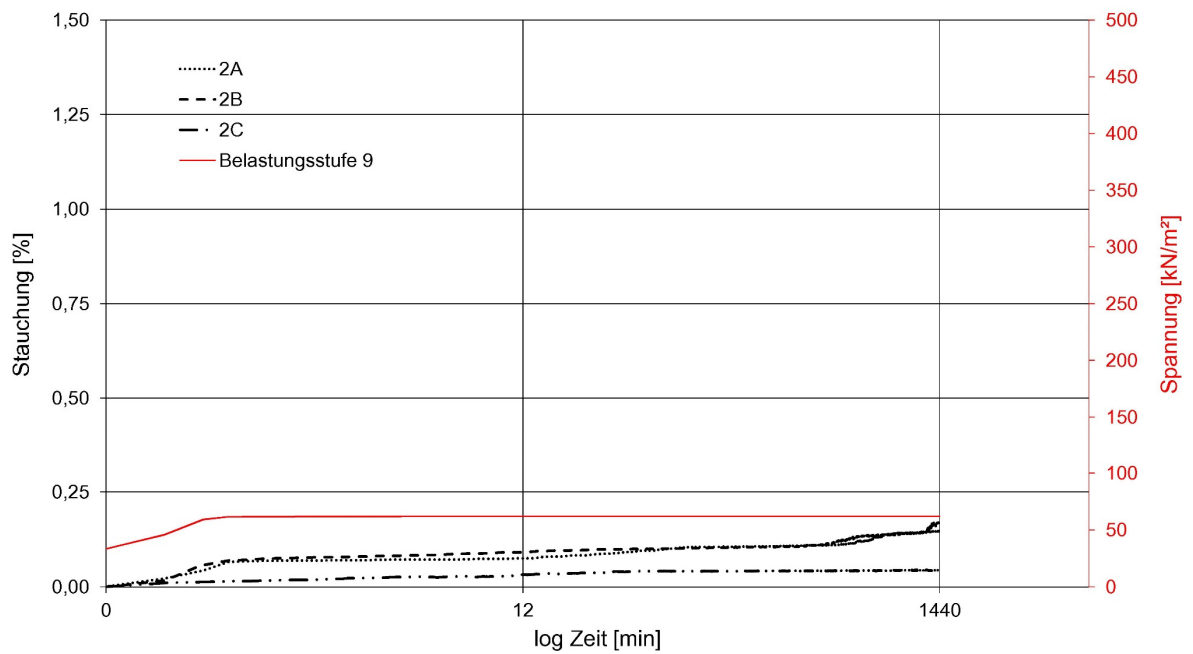


Abbildung 68: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 9 (Versuchsreihe 2)



#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

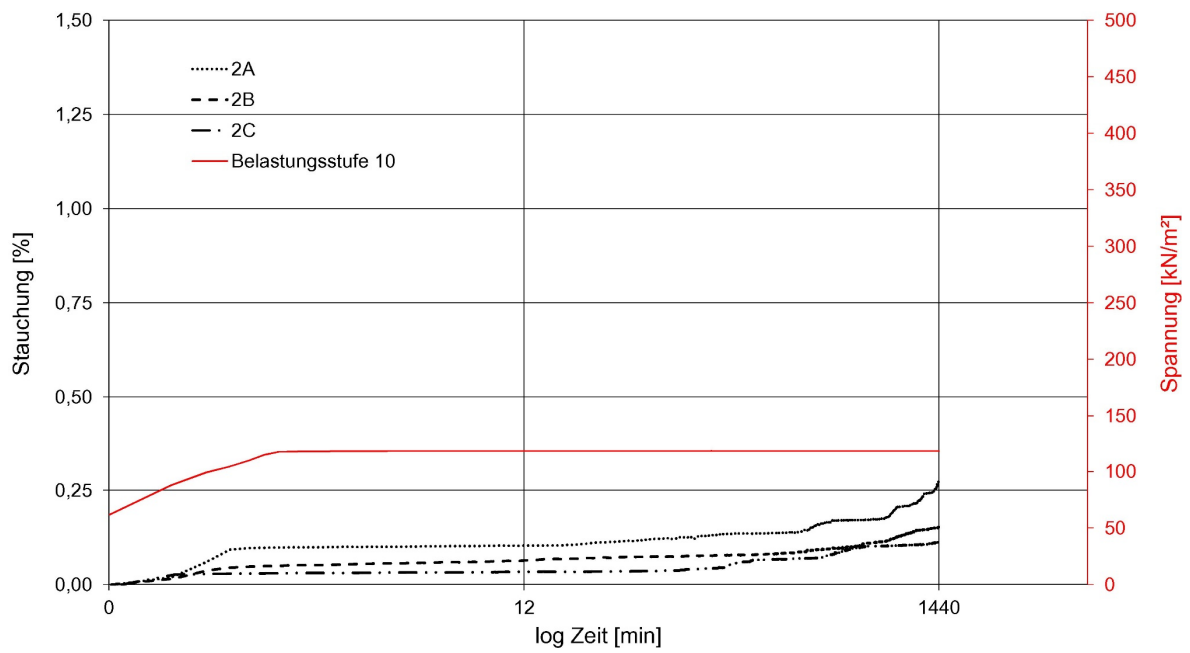


Abbildung 69: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 10 (Versuchsreihe 2)

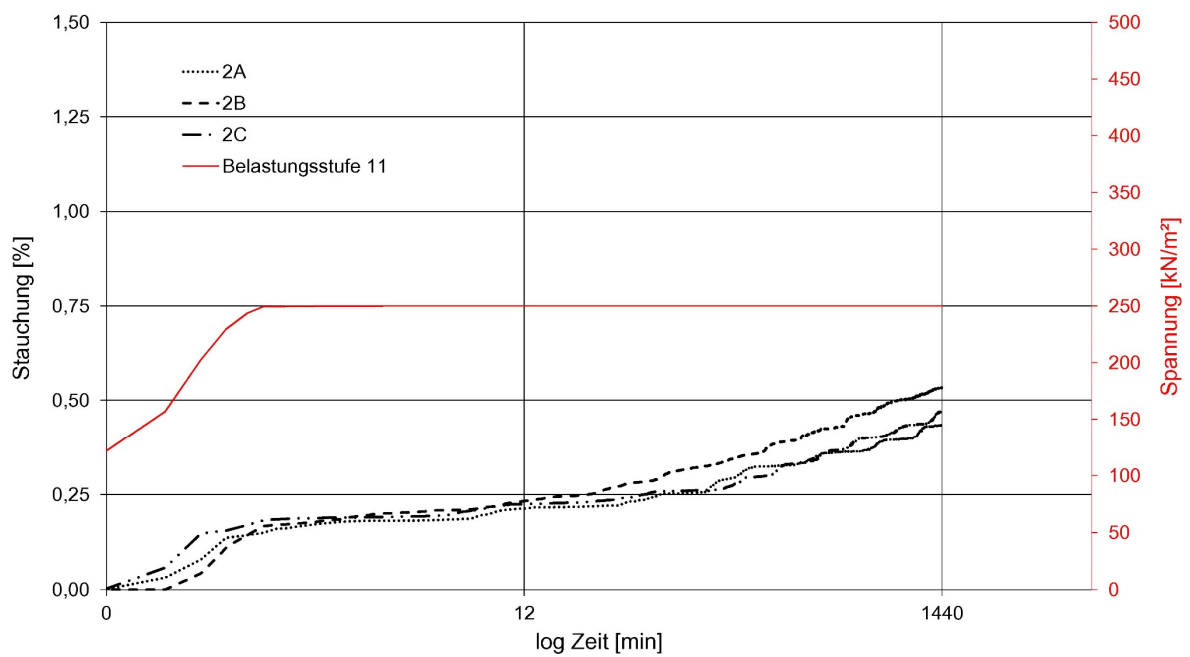


Abbildung 70: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 11 (Versuchsreihe 2)

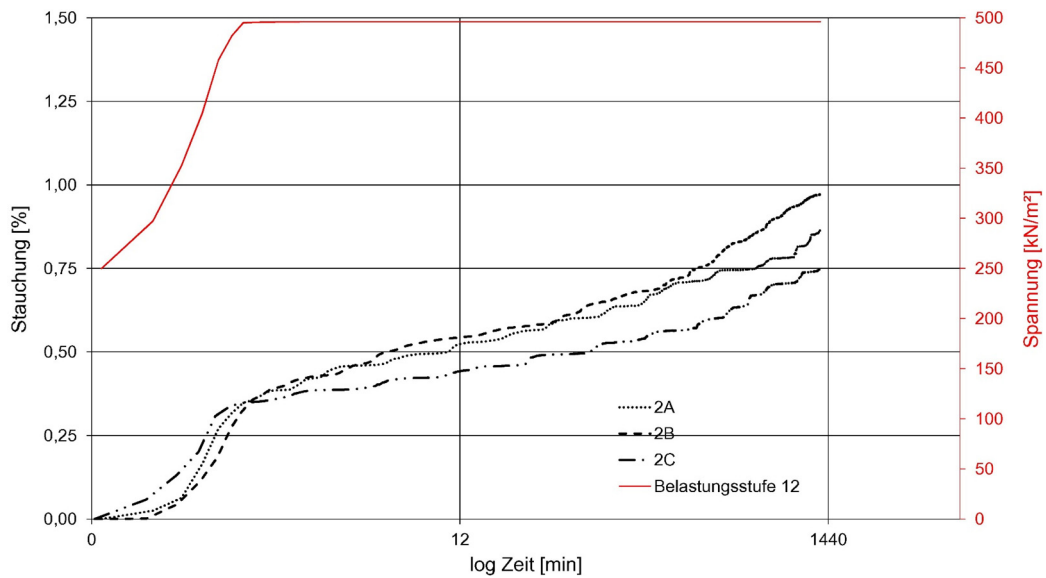


Abbildung 71: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 12 (Versuchsreihe 2)

Auch bei der Wiederbelastung ist der Verlauf der Zeit-Setzung in allen Laststufen sehr konstant und es sind keine Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Wie schon bei der Erstbelastung erfolgt ein großer Teil der Verformung in den ersten Sekunden der Laststeigerung.

#### 4.4.1.3 Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung aller Laststufen der Erstbelastung nach ÖNORM B 4420

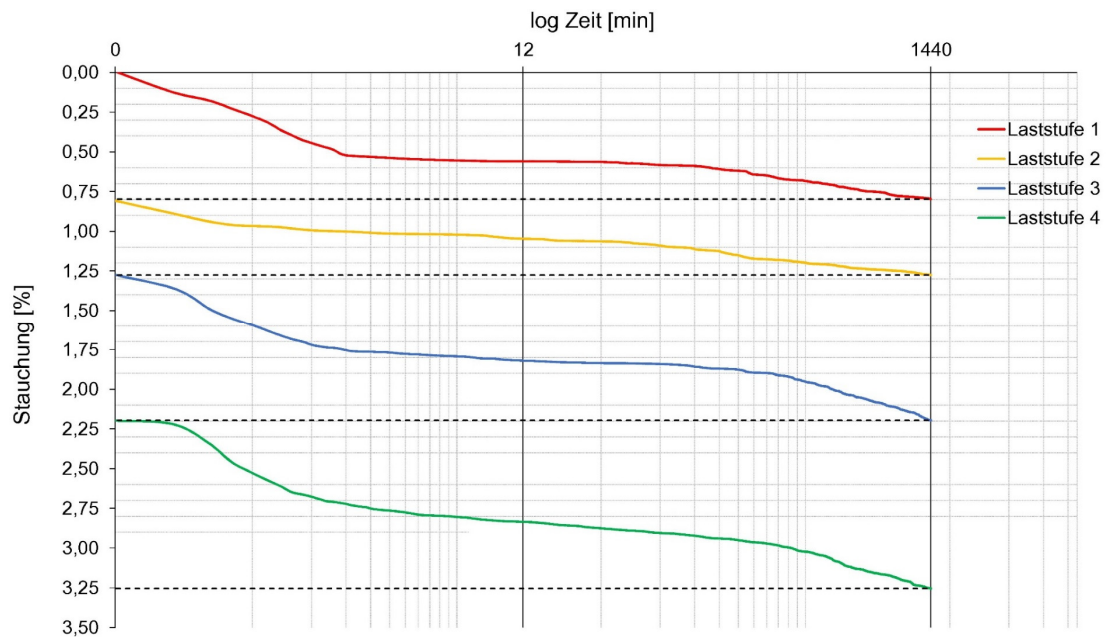


Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung bei Erstbelastung aller Laststufen (Versuchsreihe 2)

#### 4.4.1.4 Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung aller Laststufen der Wiederbelastung nach ÖNORM B 4420

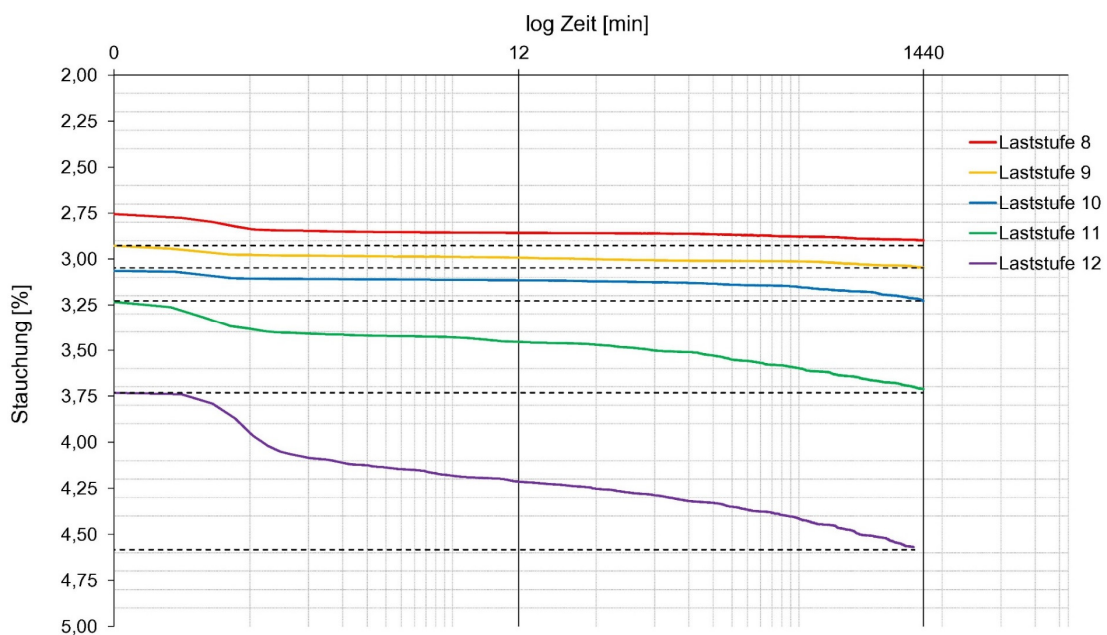


Abbildung 73: Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung der Wiederbelastung aller Laststufen (Versuchsreihe 2)

### 4.4.2 CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittswise, konstanten Belastungsraten

#### 4.4.2.1 Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung

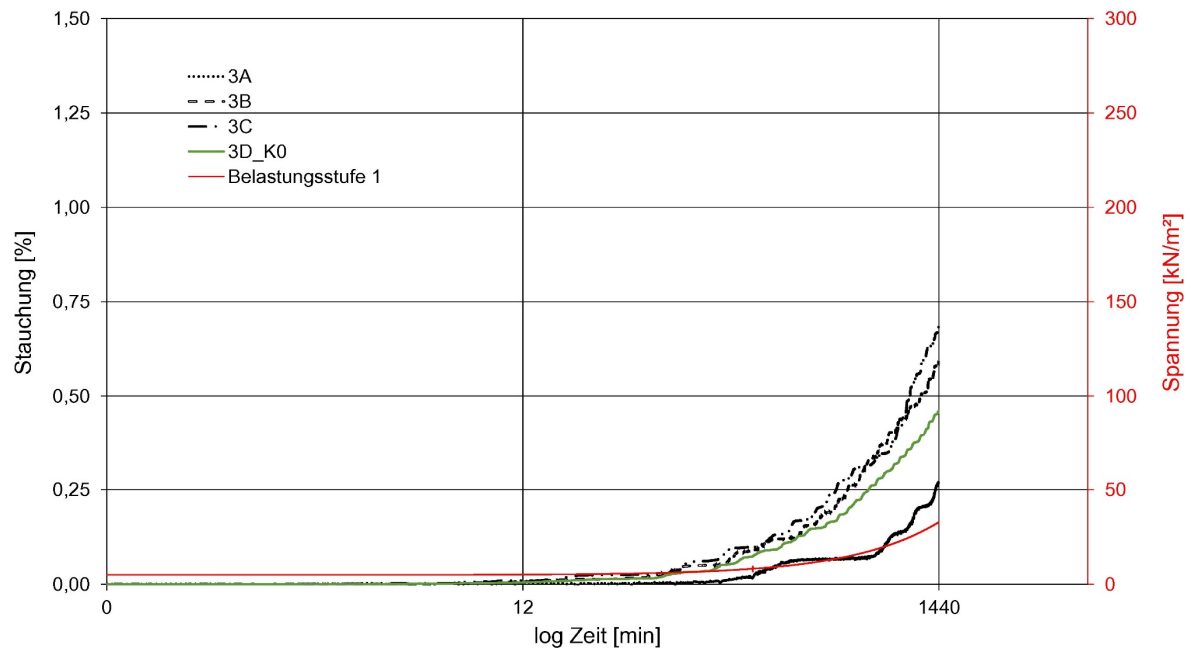


Abbildung 74: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 3)

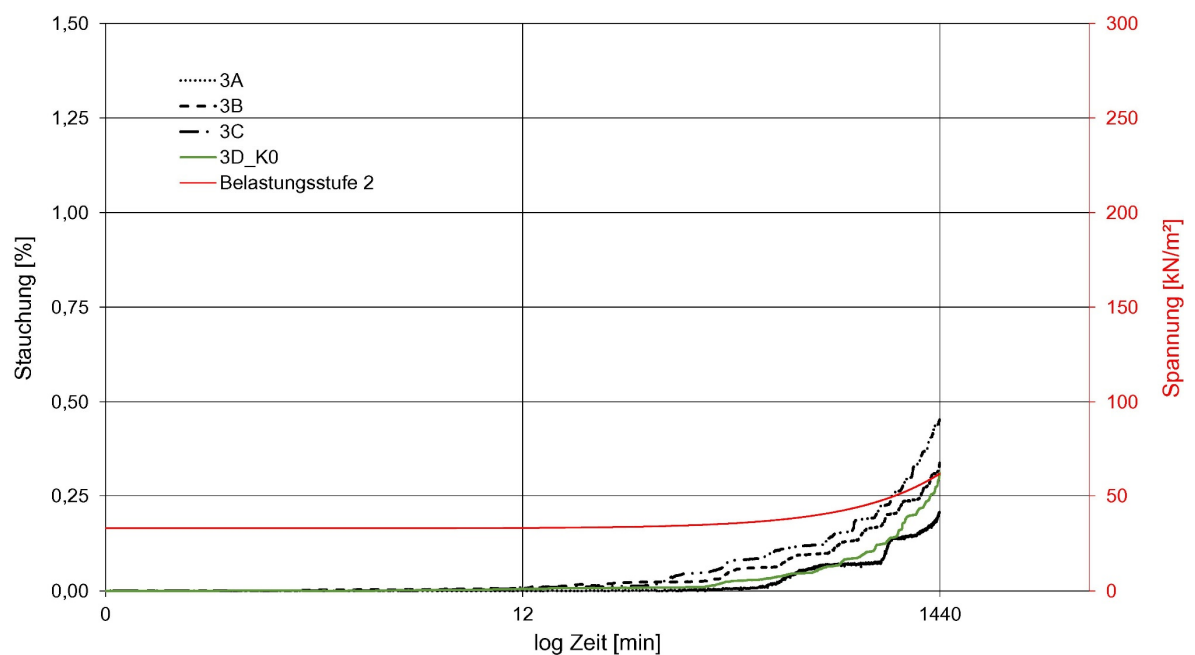


Abbildung 75: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 2 (Versuchsreihe 3)

#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

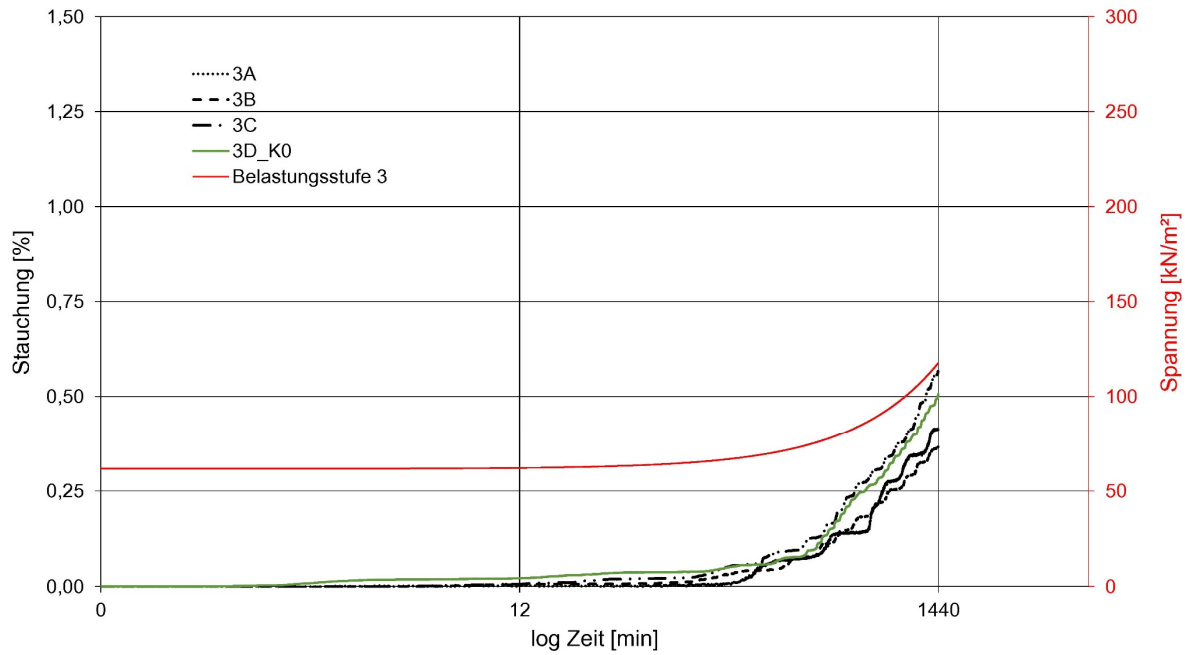


Abbildung 76: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 3)

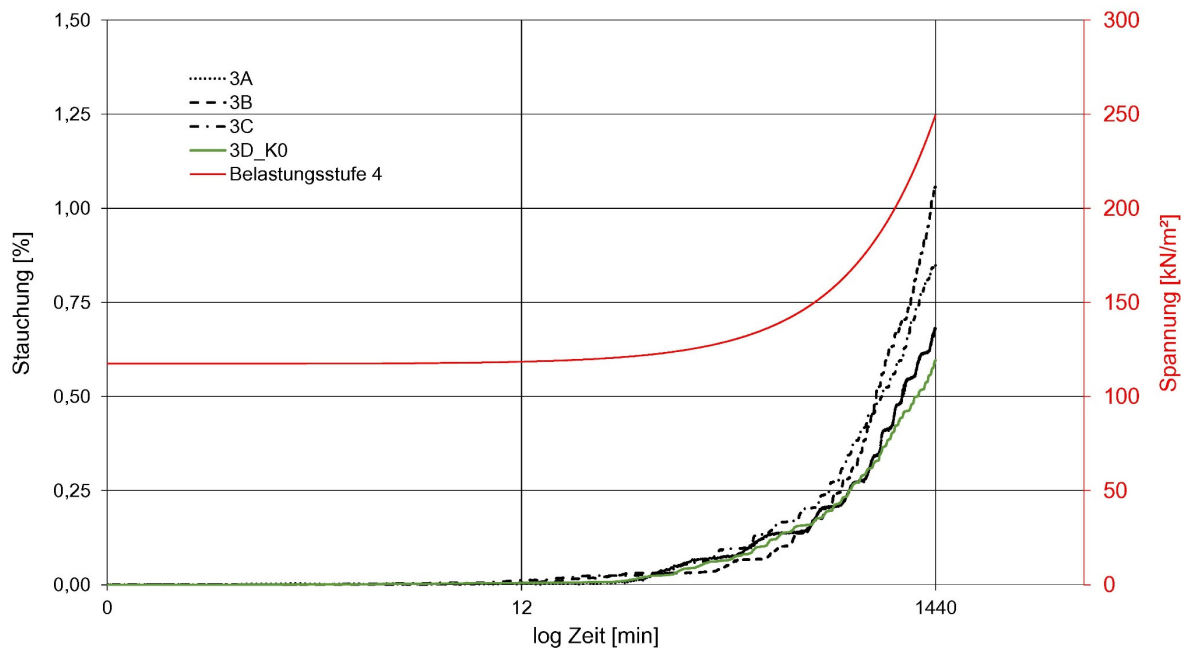


Abbildung 77: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 4 (Versuchsreihe 3)

Anders als beim Standard-Ödometerversuch sind bei dieser Art der Belastung die drei Phasen der Setzung nicht mehr erkennbar. Hier erfährt der Boden eine abschnittsweise konstante Belastungserhöhung. Die damit verbundene Setzung verläuft wie die Belastung konstant und nicht wie beim Standard-Ödometerversuch stufenweise.

Bei dieser Versuchsreihe wurde wie schon erwähnt ein Versuch unter Verwendung einer  $K_0$ -Zelle durchgeführt. Auch dieser Versuch (Probennr. 3D\_K0) verhält sich in Bezug auf

den Zeit-Setzungsverlauf ähnlich den restlichen Proben, es sind keine Abweichungen erkennbar.

#### 4.4.2.2 Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung

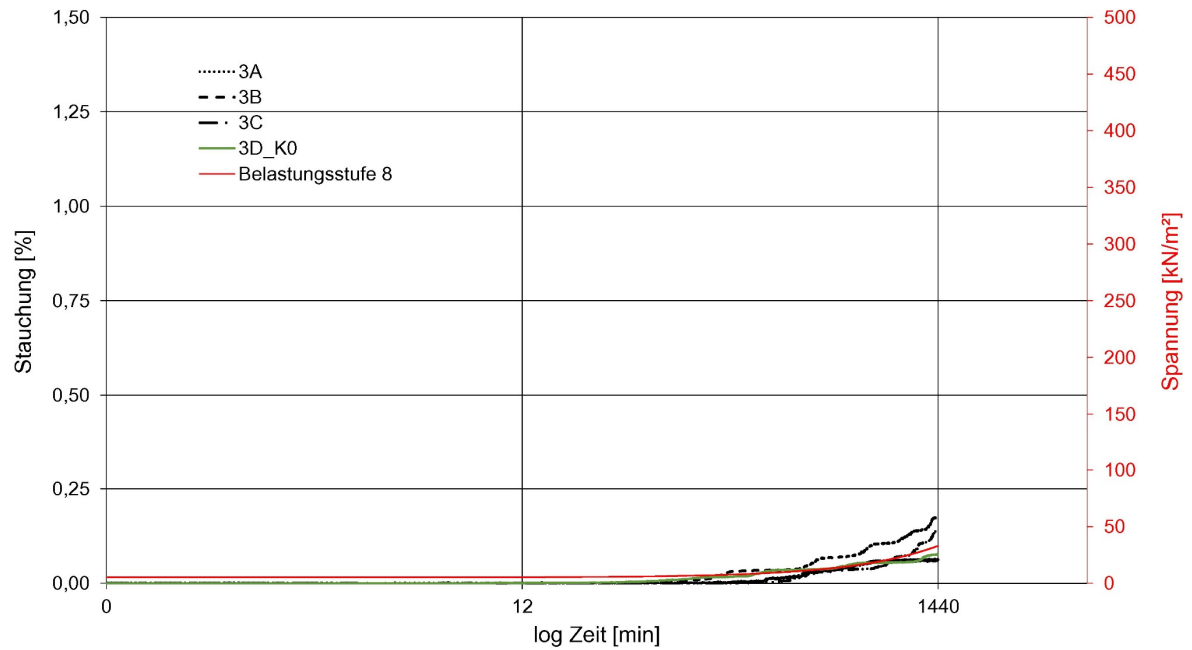


Abbildung 78: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 8 (Versuchsreihe 3)

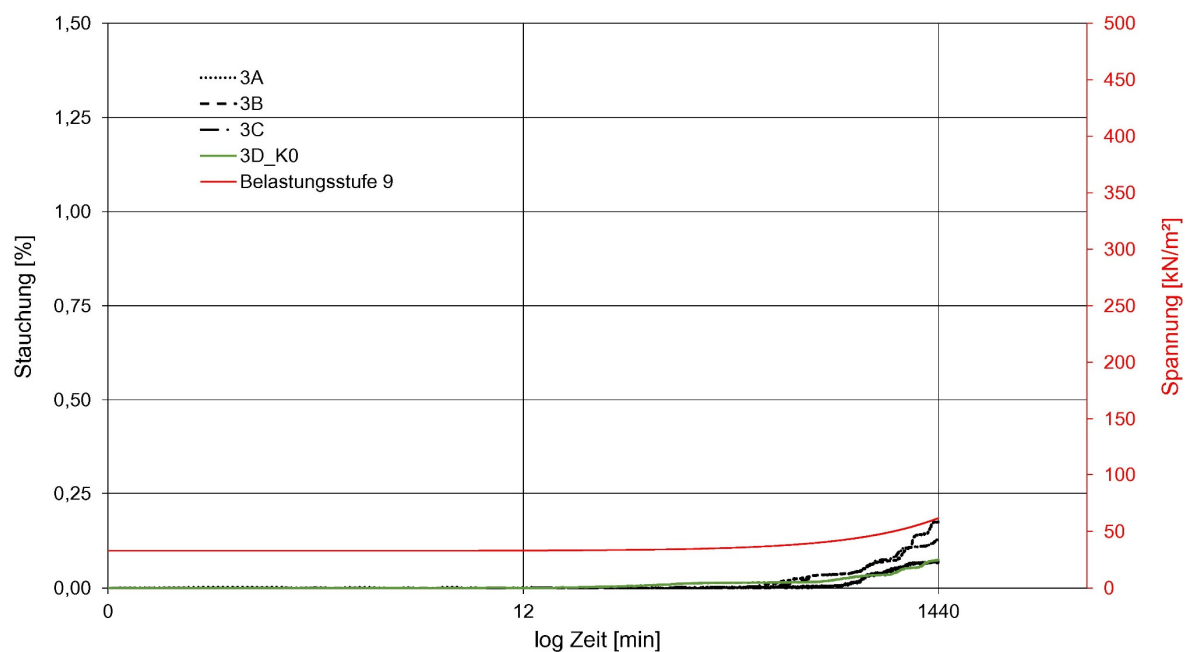


Abbildung 79: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 9 (Versuchsreihe 3)

#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

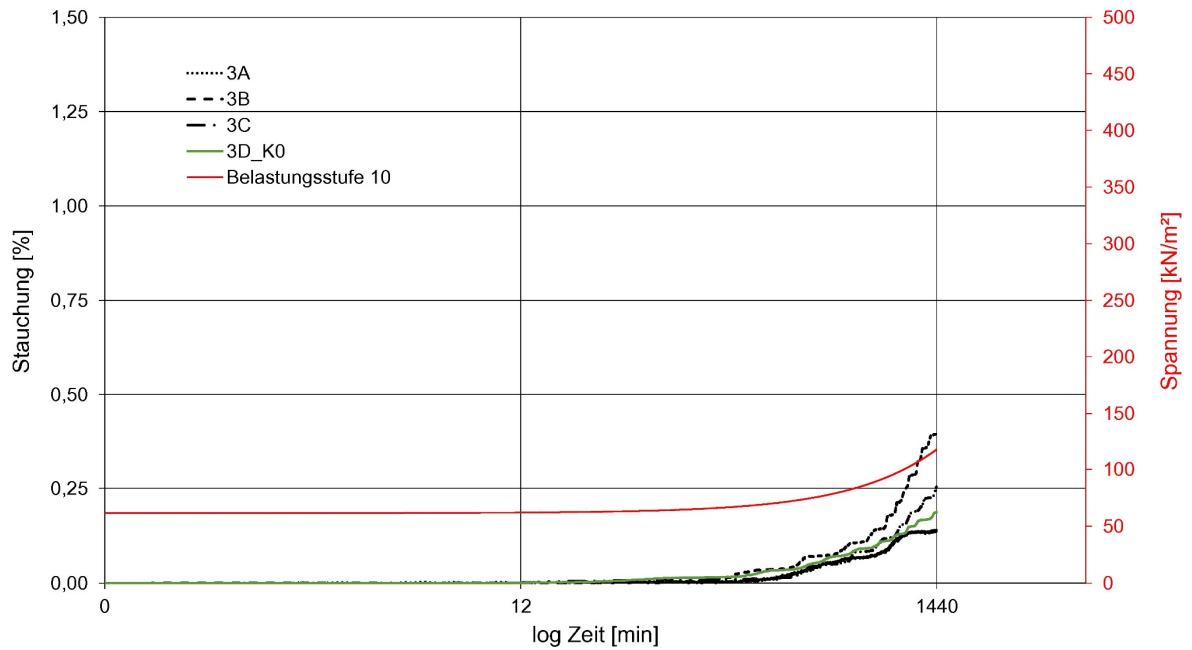


Abbildung 80: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 10 (Versuchsreihe 3)

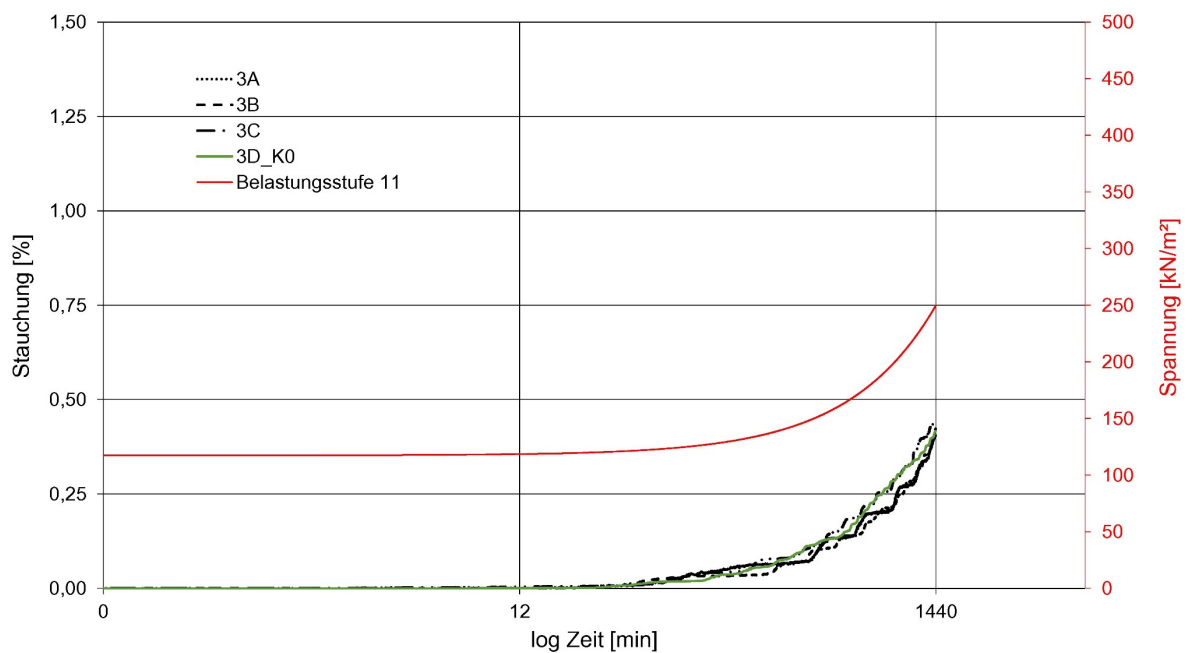


Abbildung 81: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 11 (Versuchsreihe 3)

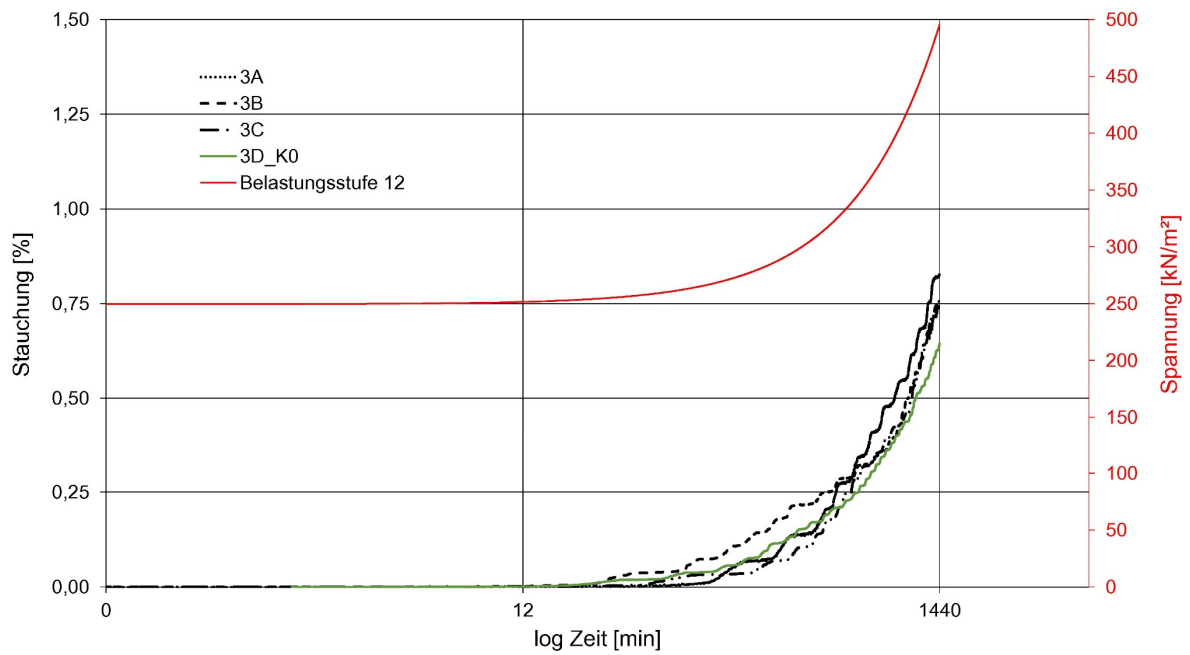


Abbildung 82: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 12 (Versuchsreihe 3)

Der Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung dieser Versuchsreihe verhält sich ähnlich der Erstbelastung. Die Setzungen steigen kontinuierlich mit der Belastungserhöhung.



### 4.4.3 CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten

#### 4.4.3.1 Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung

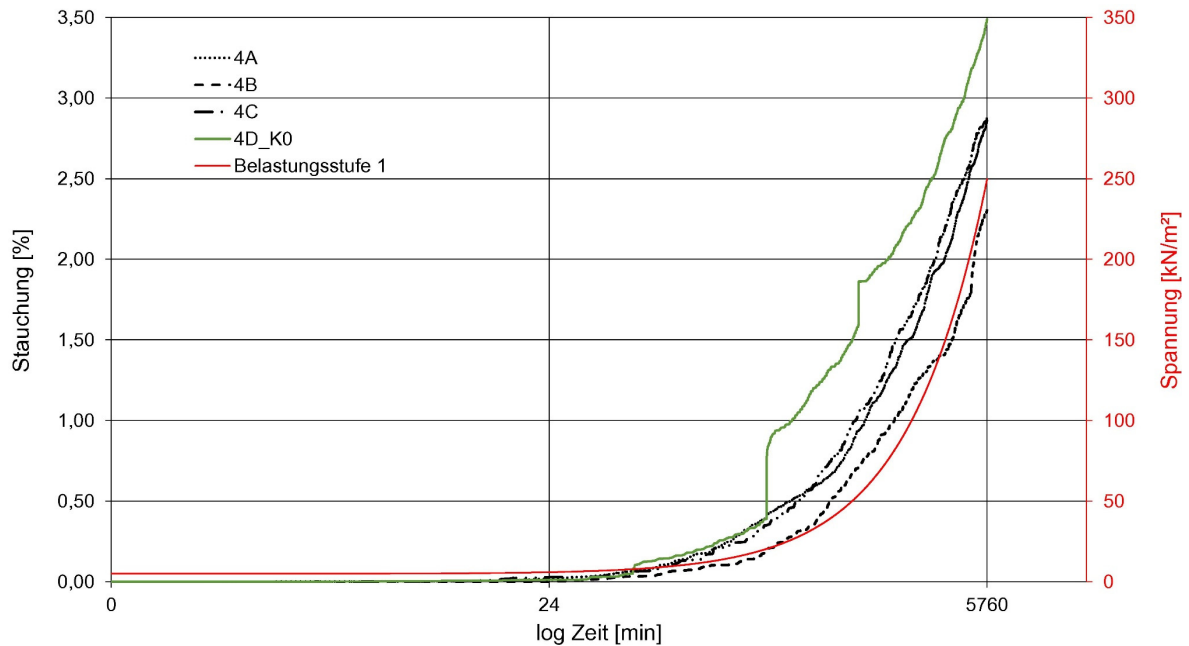


Abbildung 83: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 4)

Beim CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate kann man ein ähnliches Bild wie beim vorherigen Versuch erkennen. Hier steigen die Verformungen auch kontinuierlich mit der Belastungserhöhung an. Die drei Phasen der Setzung sind bei dieser Versuchsreihe auch nicht mehr erkennbar.

Bei dieser Versuchsreihe wurde ebenfalls ein Versuch unter Verwendung einer  $K_0$ -Zelle durchgeführt. Bei diesem Versuch (Probennr. 4D\_K0) ist ein abrupter Anstieg der Stauchung zu erkennen. Dies lässt sich auf mögliche Störungen beim Einbau der Probe in die  $K_0$ -Zelle zurückführen.

#### 4.4.3.2 Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung

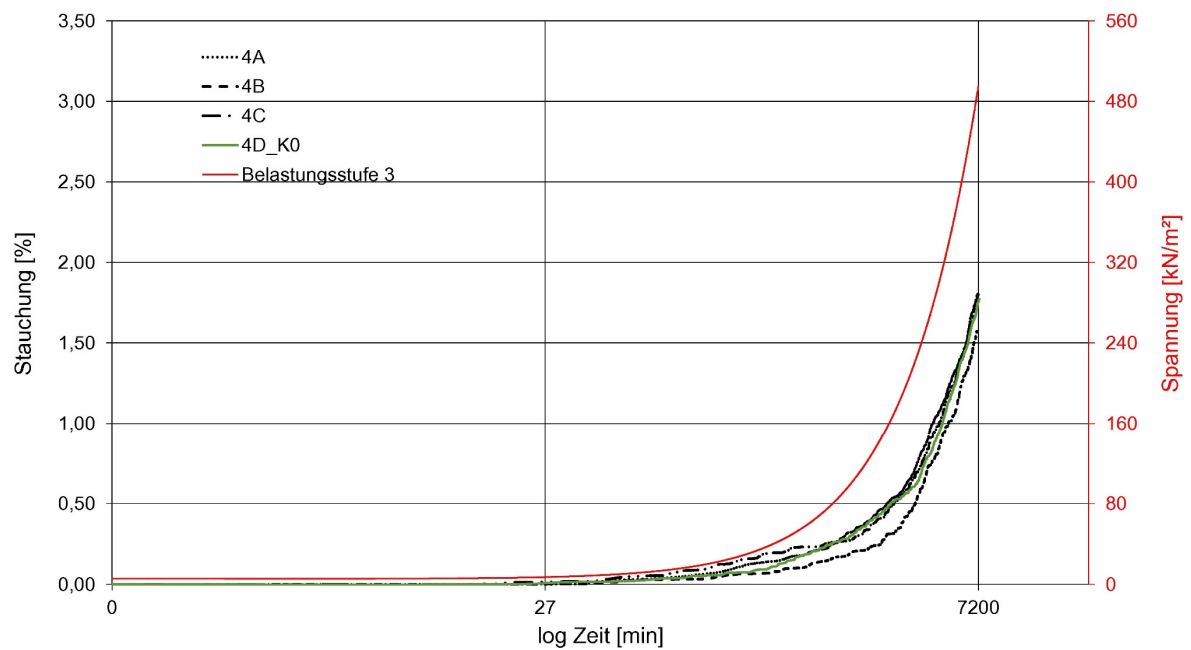


Abbildung 84: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 4)

Die Setzungen infolge der Wiederbelastung verhalten sich gleich wie bei der Erstbelastung und wie bei der Versuchsreihe 3. Die Setzung erhöht sich mit Zunahme der Belastung.

#### 4.4.4 CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h

##### 4.4.4.1 Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung

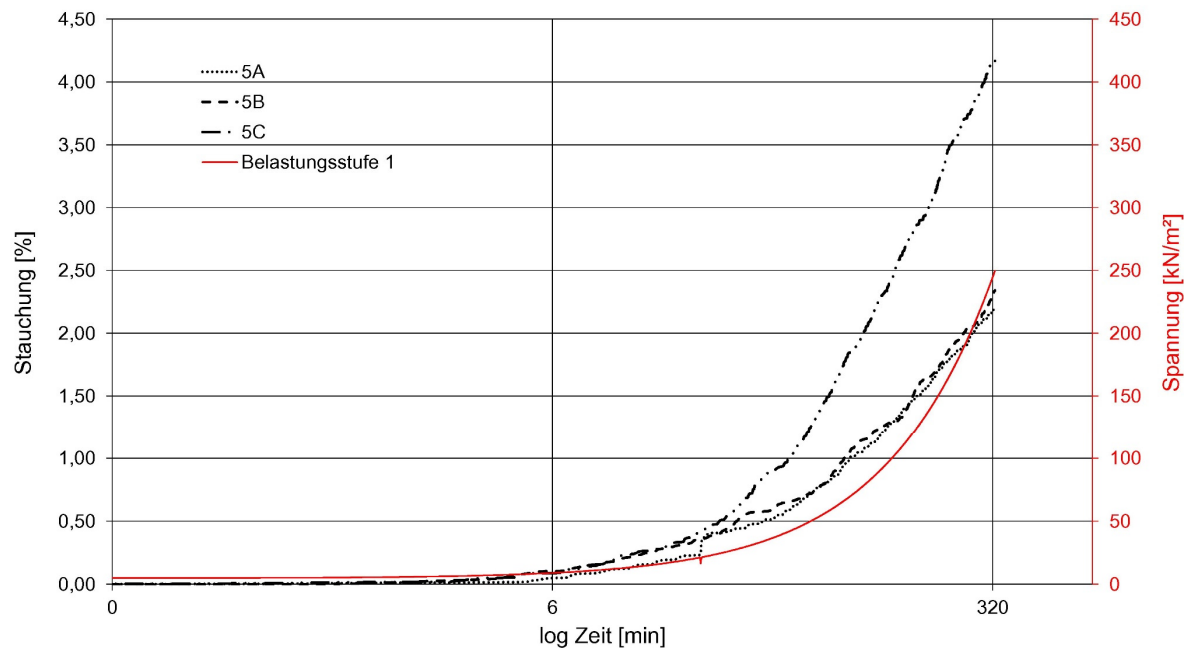


Abbildung 85: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 5)

Trotz der raschen Belastungserhöhung in dieser Versuchsreihe verhalten sich die Proben ähnlich dem Versuch mit langsamer Belastungserhöhung. Die Probe 5A weist hier jedoch eine höhere Verformung auf als die anderen zwei Proben. Der Verlauf der Zeit-Setzungslinie gleicht ihnen jedoch.

#### 4.4.4.2 Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung

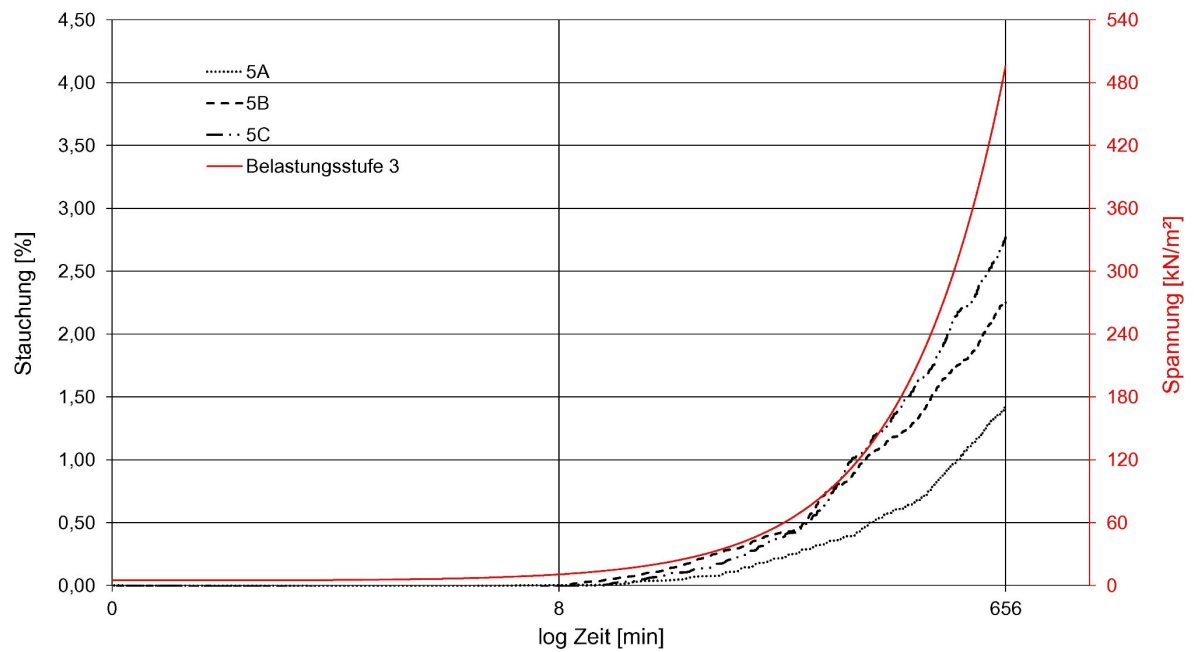


Abbildung 86: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 5)

Auch bei der Wiederbelastung unterscheidet sich der Zeit-Setzungsverlauf in dieser Versuchsreihe kaum von den vorherigen Versuchsreihen.

#### 4.4.5 CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h

##### 4.4.5.1 Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung

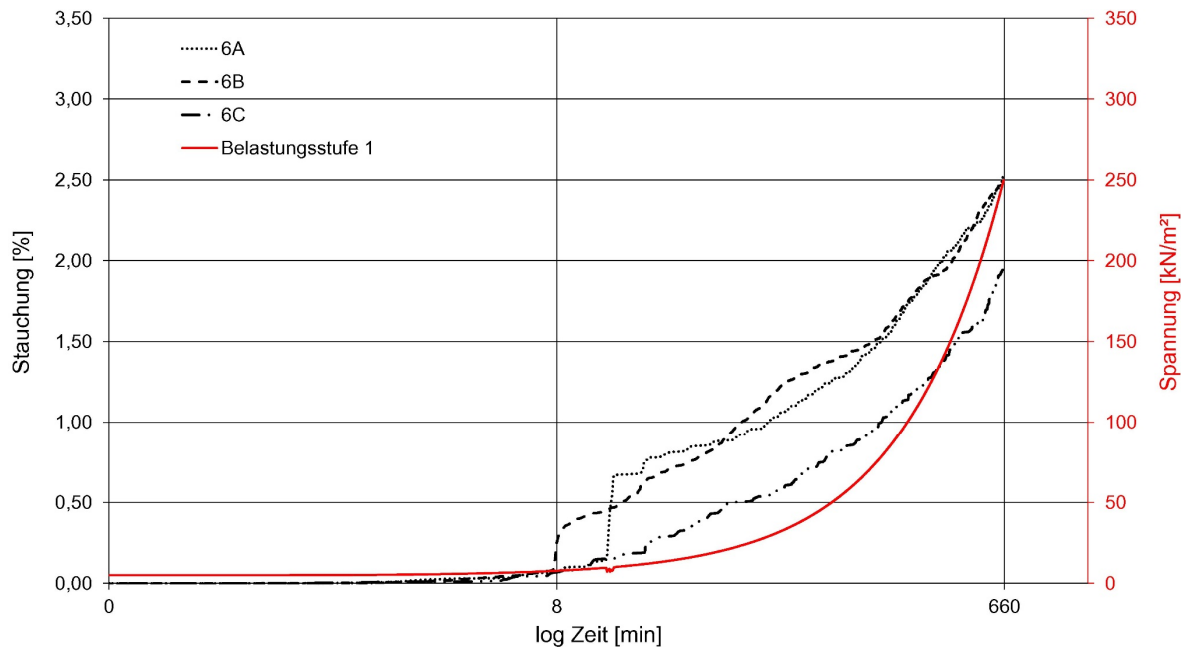


Abbildung 87: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 6)

Bei dieser Versuchsreihe wurde der CRL-Versuch mit einer Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h durchgeführt. Auffällig ist hier, dass sich bei Proben Nr. 6A und 6B die Stauchung im Bereich von 8 min schlagartig erhöht. Dies kann auf eine Störung beim Einbau der Probe in die Ödometerzelle hinweisen. Bei Probe Nr. 6C erhöht sich die Stauchung kontinuierlich mit der Erhöhung der Belastung.

#### 4.4.5.2 Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung

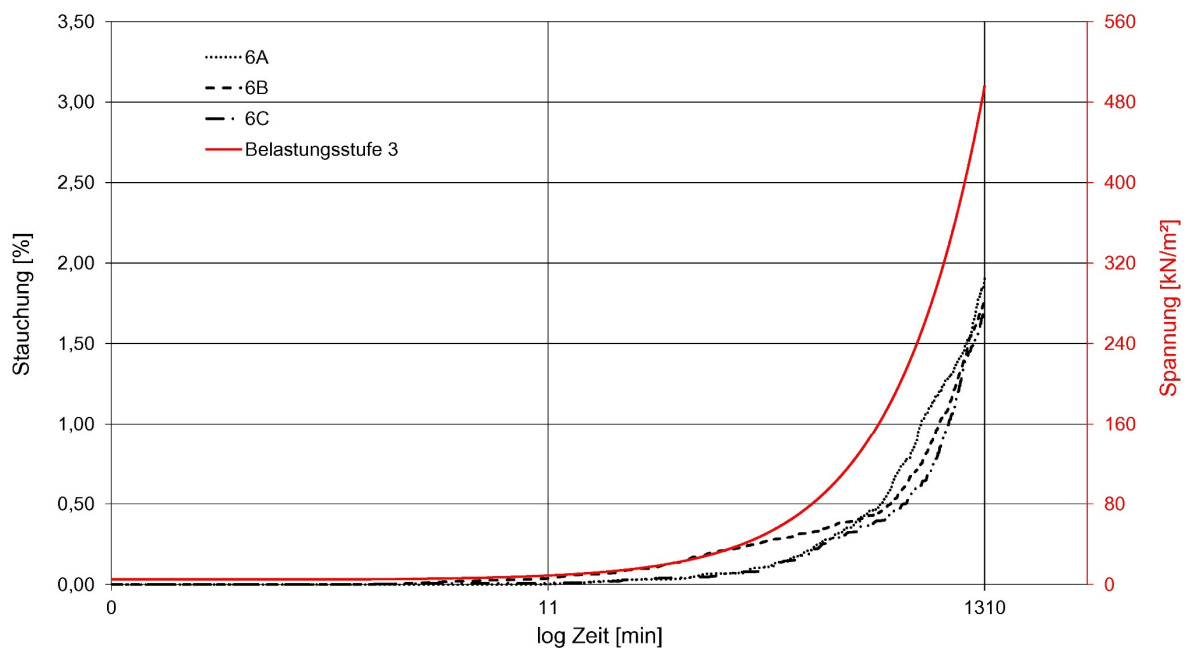


Abbildung 88: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 6)

Bei der Wiederbelastung sind im Gegensatz zur Erstbelastung keine auffälligen Störungen erkennbar. Hier erhöht sich die Stauchung wie bei den vorherigen Versuchen kontinuierlich mit der Erhöhung der Belastung.

#### 4.5 Vergleich der Zeit-Setzungslinien der zweiten und dritten Versuchsreihe

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Verläufe der Zeit-Setzungslinien der Mittelwerte der zweiten und dritten Versuchsreihe miteinander verglichen.

Bei diesen Versuchsreihen handelt es sich um Standard-Ödometerversuche mit stufenweiser Belastung welche im vollautomatischen Kompressionsgerät durchgeführt wurden und um CRL-Versuche mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittswisen konstanten Belastungsraten. Diese zwei Versuchsreihen lassen sich auf Grund ihrer identen Laststufen und Lastdauern sehr gut miteinander vergleichen.

Auch hier wurde zu Beginn jeder neuen Laststufe die prozentuelle Stauchung auf null gesetzt, sodass der Verlauf der einzelnen Proben besser vergleichbar ist. Durch das Aufzeichnungsintervall von 6 sec kann das Zeit-Setzungsverhalten über die Länge des gesamten Versuches überwacht werden.

Die Darstellung der Zeit-Setzungslinie erfolgt im logarithmischen Maßstab, da die größte Stauchung zumeist in den ersten Minuten bzw. Sekunden auftritt.

#### 4.5.1 Zeit-Setzungsverlauf der Erstbelastung

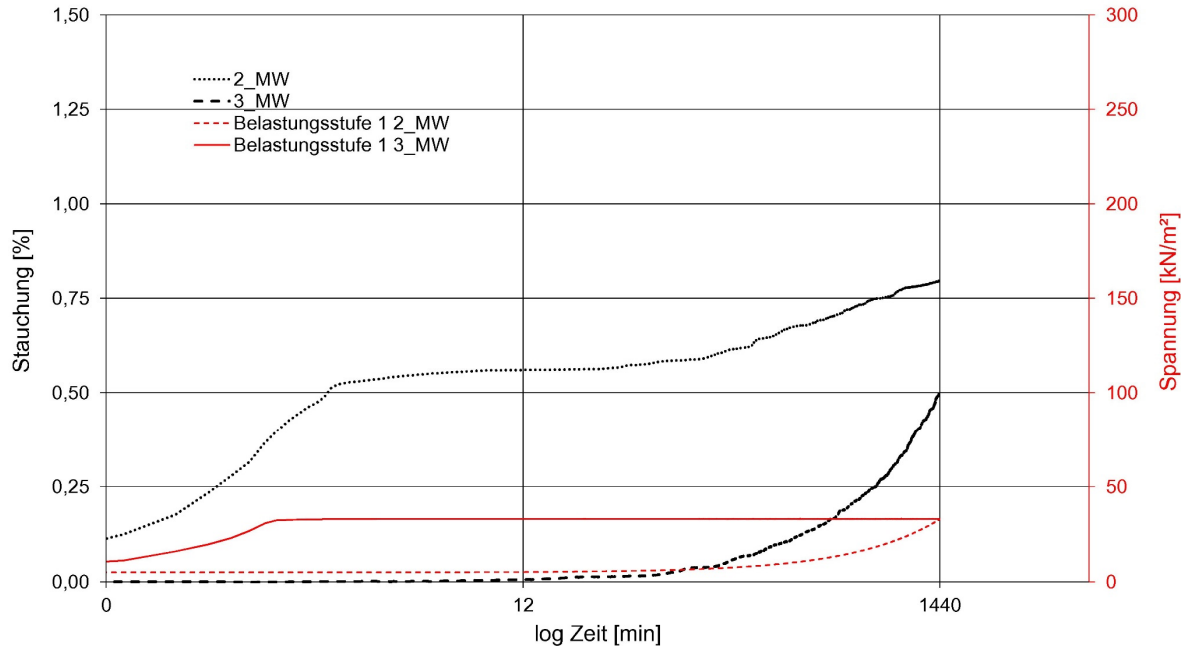


Abbildung 89: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 1

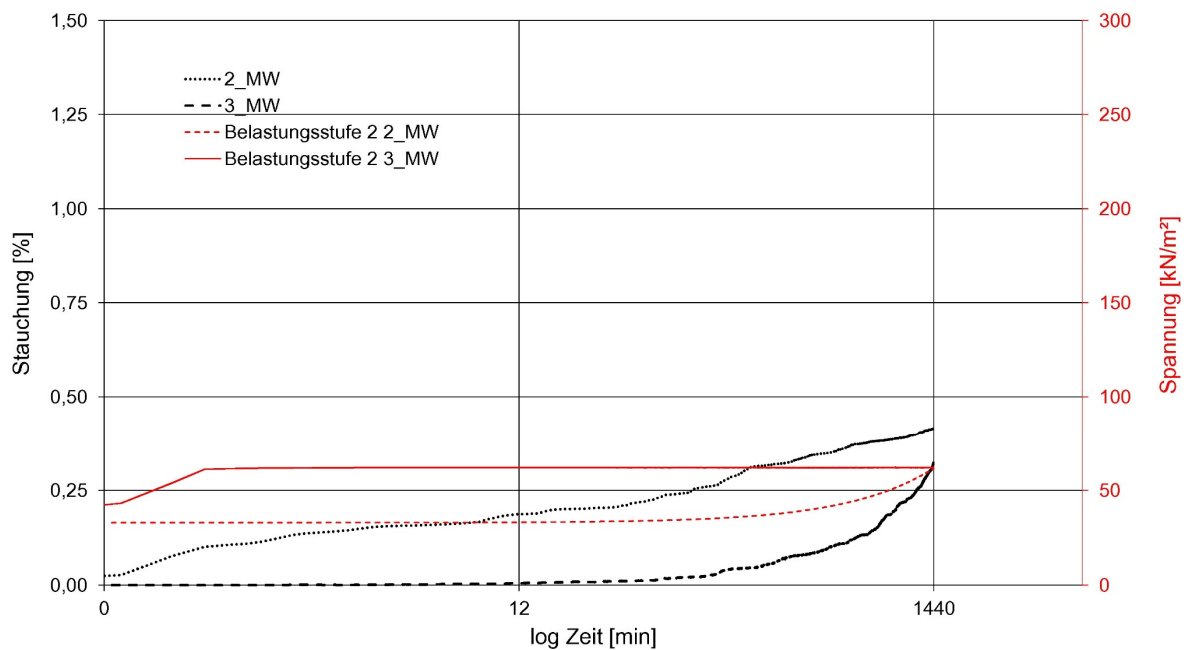


Abbildung 90: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 2

#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

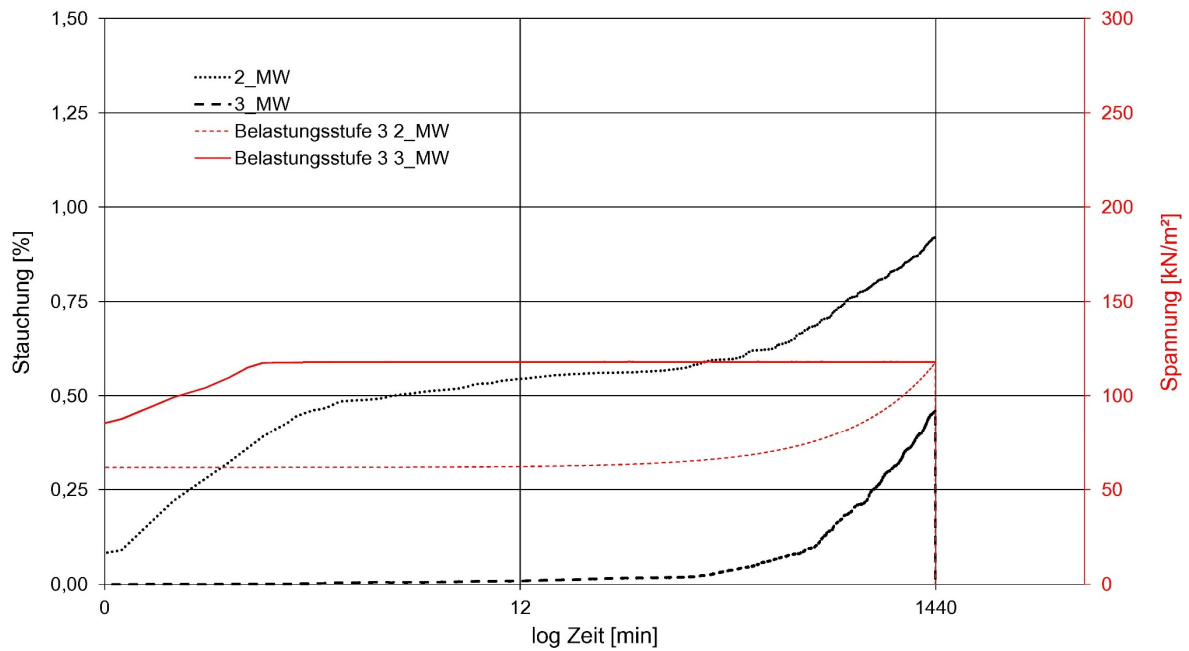


Abbildung 91: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 3

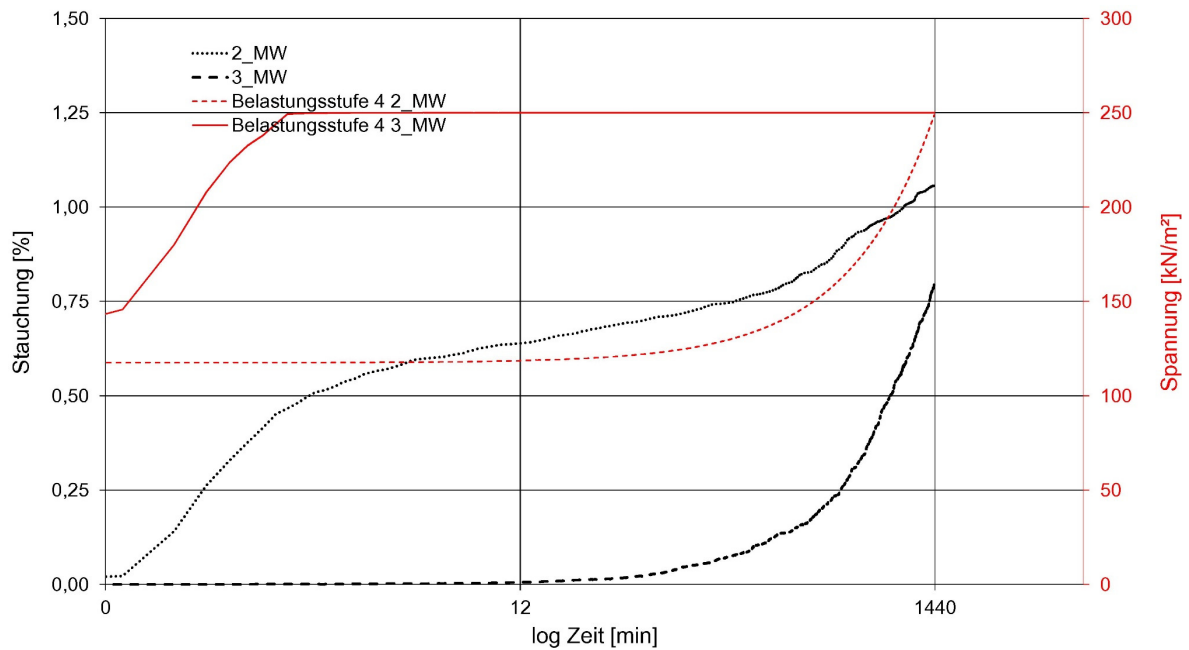


Abbildung 92: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 4

In den oben dargestellten Diagrammen ist der Unterschied des Verlaufes der Zeit-Setzung der beiden Versuchsreihen sehr gut zu erkennen. Bei der Versuchsreihe 2\_MW erfährt die Stauchung auf Grund der stufenweisen Belastung einen plötzlichen Anstieg. Bei der Versuchsreihe 3\_MW verläuft die Stauchung jedoch ähnlich der Belastung fließend. Es sind Abweichungen der Endstauchung erkennbar, die jedoch vernachlässigbar gering sind.



### 4.5.2 Zeit-Setzungsverlauf der Wiederbelastung

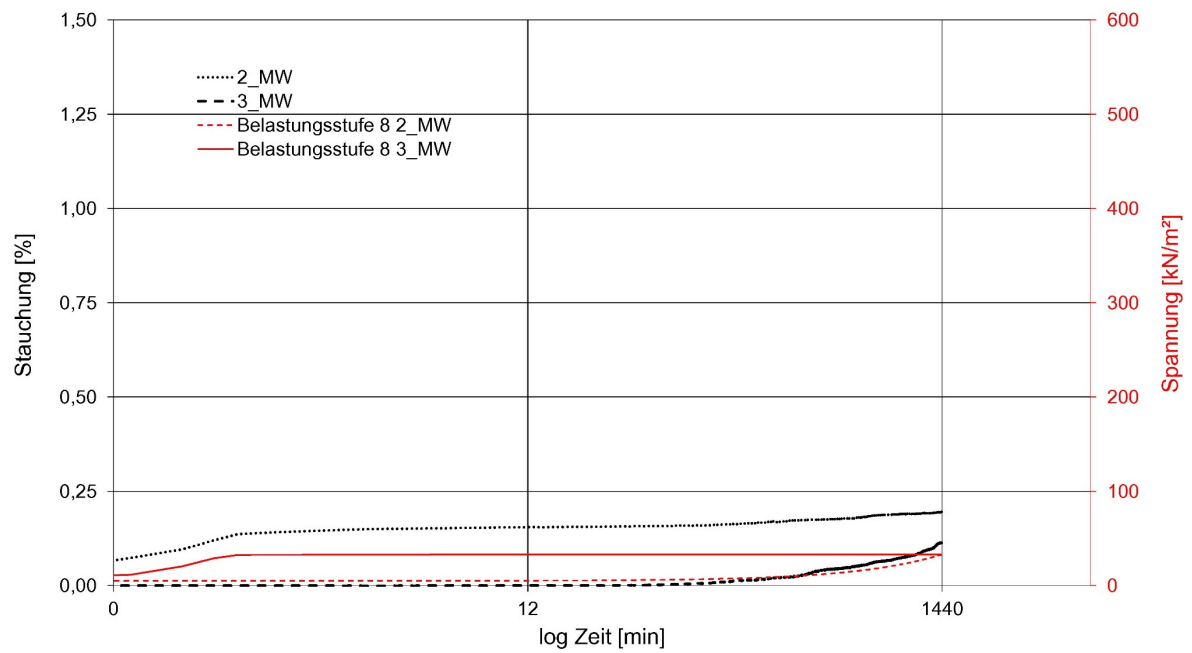


Abbildung 93: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 8

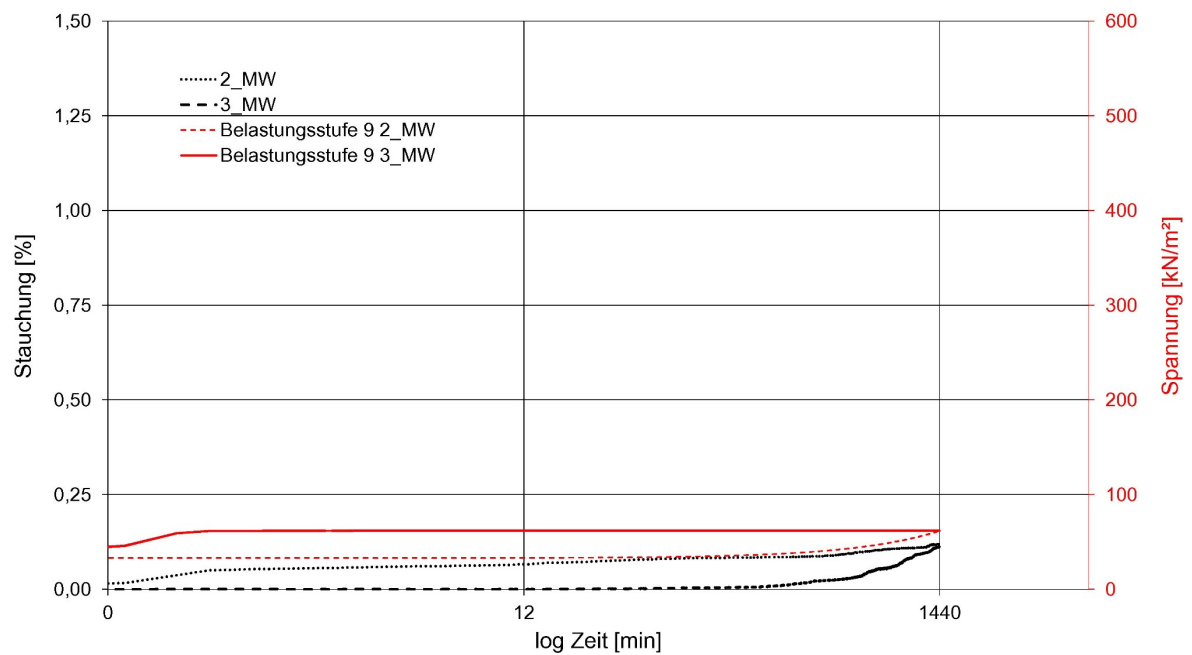


Abbildung 94: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 9

#### 4 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

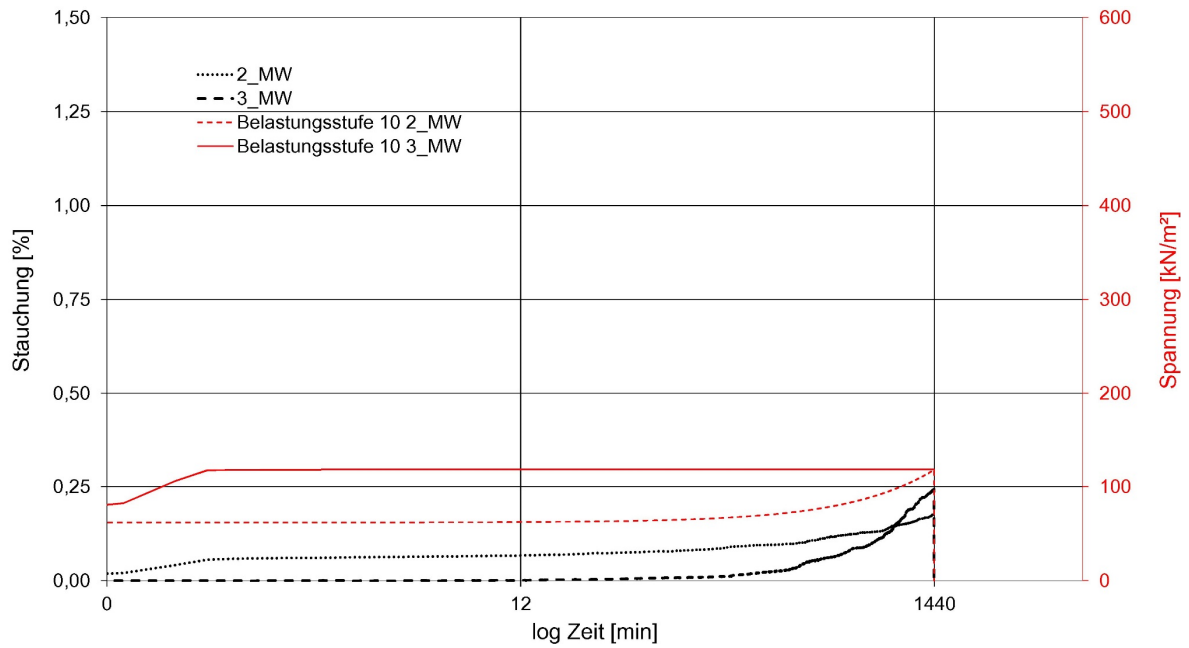


Abbildung 95: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 10

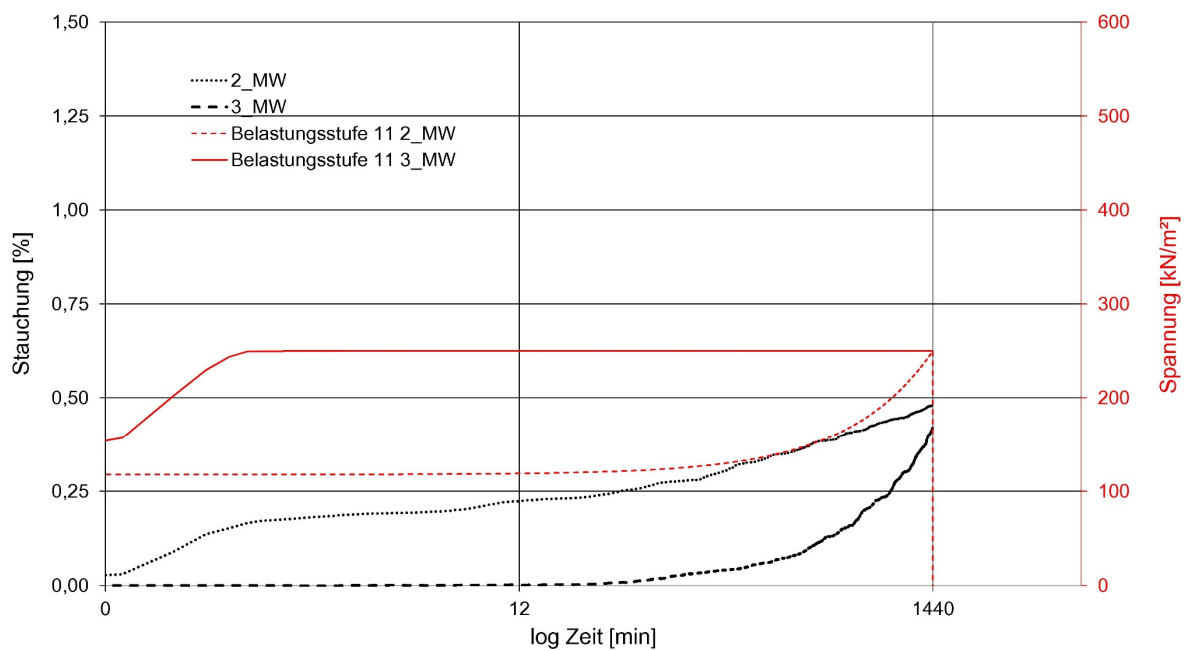


Abbildung 96: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 11

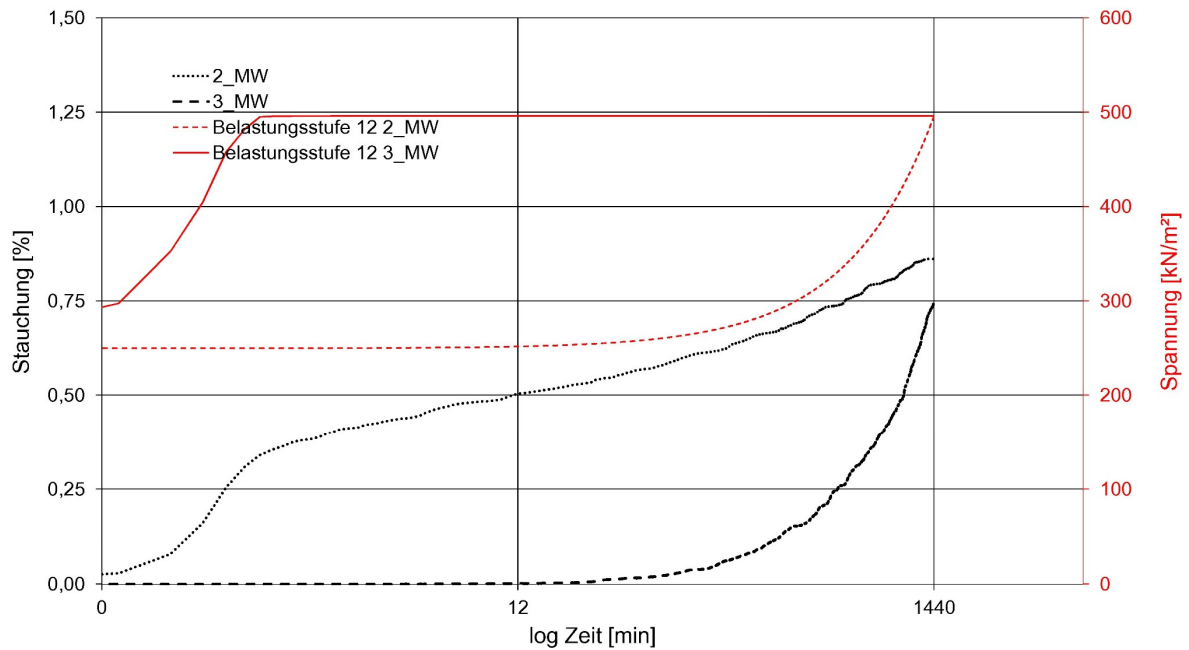


Abbildung 97: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 12

Die Verläufe der Zeit-Setzung verhalten sich bei der Wiederbelastung ähnlich der Verläufe der Erstbelastung. Bei der Versuchsreihe 2\_MW erfährt die Stauchung auf Grund der stufenweisen Belastung einen plötzlichen Anstieg, wobei bei der Versuchsreihe 3\_MW der Verlauf ähnlich der Belastung fließend verläuft. Es sind Abweichungen der Endstauchung erkennbar, die jedoch vernachlässigbar gering sind.

## 5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Trotz der raschen Entwicklung in Bezug auf Gerätetechnik und Datenverarbeitung werden Kompressionsversuche, als Grundlage zur Setzungsberechnung von Bauwerken, bis heute zum größten Teil noch mit mechanischen Kompressionsgeräten durchgeführt.

Grundlage dieser Kompressionsversuche ist die von *Terzaghi* (1925) aufgestellte Lösung zur eindimensionalen Konsolidationstheorie. Beim Standardkompressionsversuch, welcher auf den Erkenntnissen von *Terzaghi* (1925) beruht, wird die Last in inkrementellen Stufen in einer Zeitdauer von 24 Stunden aufgebracht. Dies hat zum Nachteil, dass Kompressionsversuche dieser Art eine deutlich längere Versuchsdauer aufweisen, als die in den letzten 50 Jahren weiter entwickelten Versuche mit monotoner Lastaufbringung. Zusätzlich kommt die stufenweise Verdoppelung der Lastinkremente beim Standard-Ödometerversuch in praktischen Bauvorhaben bzw. in der Natur nicht vor.

Ungeachtet der bereits vorhandenen theoretischen Grundlagen für die weiterentwickelten Versuche wurden diese, im Gegensatz zum Standardkompressionsversuch, noch in keine nationalen oder internationalen Normen aufgenommen. Dies trägt dazu bei, dass diese Arten von Kompressionsversuchen in der Praxis noch kaum zur Anwendung kommen.

Ziel dieser Arbeit war es, mit in Bezug auf die Art der Belastung unterschiedlichen Versuchsmethoden, Kompressionsversuche im mechanisch gesteuerten Kompressionsgerät und im elektronisch gesteuerten Kompressionsgerät mit automatischer Messwerterfassung durchzuführen und die Ergebnisse mit jenen der Standardkompressionsversuche zu vergleichen. Diese Versuche wurde für mittelplastische Schluffe in halbfester Konsistenz durchgeführt.

Insgesamt wurden folgende sechs Versuchsreihen mit unterschiedlichen Belastungsarten durchgeführt:

- Standard-Ödometerversuch im mechanischen Kompressionsgerät
- Standard-Ödometerversuch im vollautomatischen Kompressionsgerät
- CRL-Versuch mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittweisen, konstanten Belastungsraten
- CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten
- CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m<sup>2</sup>/h
- CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m<sup>2</sup>/h

Die untenstehenden Kennwerte und Verläufe wurden zunächst innerhalb der einzelnen Versuchsreihen hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit verglichen.

Hierbei wurden folgende Parameter und Darstellungen ausgewertet:

- Steifemodul
- Druck-Porenzahl-Diagramm
- Druck-Verformungslinie
- Kompressionsbeiwert
- Schwellbeiwert
- Zeit-Setzungslinie

Anschließend wurden die Mittelwerte der Versuchsreihen gegenübergestellt.

Vorweg ist anzumerken, dass die gewonnenen Erkenntnisse nur für den in dieser Arbeit untersuchten Boden, den „Wiener Tegel“ gelten und keine Rückschlüsse auf Böden mit anderen Kornzusammensetzungen oder Zustandsformen gezogen werden können.

Im Rahmen der Versuche zeigte sich, dass trotz großer Unterschiede in der Art der Belastung und vor allem der Dauer der Belastung kaum Abweichungen der Ergebnisse zum Standard-Ödometerversuch aufgetreten sind. Auch bei der Durchführung von CRL-Versuchen, welche eine um eine vielfache geringere Versuchsdauer aufweisen, wodurch ein möglicher Porenwasserüberdruck in der Bodenprobe herrschen kann, traten kaum bzw. vernachlässigbare Abweichungen zum Standard-Ödometerversuch auf.

Lediglich zwei Versuchsreihen, bei welchen die Versuche mit einer konstanten Belastungsrate (CRL-Versuch) durchgeführt wurden, wichen minimal von den restlichen Versuchsreihen ab. Dies lässt sich jedoch auf die etwas höheren Dichten der Proben zurückführen.

Die Versuche in dieser Arbeit stellen nur einen Bruchteil der Möglichkeiten in Hinblick auf die verschiedenen Belastungsarten und Belastungsraten dar, welche mit elektronischen, vollautomatisch gesteuerten Kompressionsgeräten durchgeführt werden können.

Weiterführende Vergleichsversuche von CRL-Versuchen mit Böden anderer Konsistenz, anderer Kornzusammensetzung und anderer Durchlässigkeit sind ebenso notwendig wie numerische Modellierungen. Erst auf Basis weiterführender Ergebnisse erscheint eine Aufnahme alternativer Versuchsdurchführungen, vor allem von CRL-Versuchen, in nationale und internationale Regelwerke realistisch.

## 6. Literaturverzeichnis

Aboshi, H., Yoshikutti, A., Mariyama, S.: Constand Loading Rate Consolidation Test, Soils and Foundations 10, No. 1, pp. 43-56, 1970

Adam, D.: Grundbau und Bodenmechanik I – Übungsunterlagen, Formänderungseigenschaften von Böden, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2016

Adam, D.: Grundbau und Bodenmechanik I – Studienunterlagen zur Vorlesung, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2. Auflage, 2010

Blovsky, S.: Grundbau und Bodenmechanik II – Studienunterlagen zu den Laboratoriumsübungen, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2013

Burghignoli, A.: An experimental study of the structural viscosity of soft clays by means of continous consolidation tests, proceeding of the 7th ECSMFE, Brighton, Vol. 2, pp. 23-28, 1979

Crawford, C.B.: Interpretation of the consolidation test, ASCE 90, pp. 87-102, 1964

DIN 18135: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch, Ausgabe: 2012-04

DIN EN ISO 17892-5 : Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 5: Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung; Deutsche Fassung prEN ISO 17892-5, 2014

Gorman, C.T.: Constant rate-of-strain and controlled-gradient consolidation testing, Research Report, No. 866, Kentucky Transportation Center, 1976

Hamilton, J.J., Crawford C.B.: Improved determination of preconsolidation pressure of sensitive clays, ASTM, Special Technical Publication 254, pp. 254-271, 1959

Hansbo, S.: Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains, Proceedings Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, 1960

Hornig, E.D.: Eindimensionale Kompression überkonsolidierter bindiger Böden am Beispiel des Gipskeupers, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 21. Oktober 2011

Hornig, E.D.: Verformungsverhalten vorbelasteter Tonböden, Forschungsbericht des Fachbereiches Bauingenieurwesen – Geotechnik der Fachhochschule Stuttgart, 2002

Janbu, N., Tokheim, O., Senneset, K.: Consolidation Tests with Continuous Loading, Proceeding of the 10th ICSMFE, Stockholm, Sweden, Vol 1, pp.645-654, 1981

Jänke, S.: Einflüsse auf die Ergebnisse von Kompressionsversuchen im Ödometer, Sonderdruck aus „Berichte aus der Bauforschung“, Heft 95, 1974

Kempfert, H.G., Raithel M.: Geotechnik nach Eurocode, Band 1: Bodenmechanik, Beuth Verlag GmbH, 3. Auflage, 2012

Möller, G.: Geotechnik kompakt – Bodenmechanik, Bauwerk Verlag GmbH, 2. Auflage, 2008

ÖNORM B 4400-1: Geotechnik – Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden, Ausgabe: 2010-03-15, Wien

ÖNORM B 4410: Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung, Ausgabe: 2009-09-01, Wien

ÖNORM B 4411: Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, Ausgabe: 2009-07-01, Wien

ÖNORM B 4412: Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung, Ausgabe: 1974-07-01, Wien

ÖNORM B 4413: Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpknometer, Ausgabe: 1975-07-01, Wien

ÖNORM B 4420: Erd- und Grundbau – Untersuchung von Bodenproben – Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Kompressionsversuchen, Ausgabe: 1989-01-01, Wien

Sällfors, G.: Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays, Ph.Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1975

Sällfors, G.: New oedometer routines – advantages in engineering practice, Istanbul Conference Soil Mechanics, Vol. 1, pp. 129-136, 1976

Smith, R.E., Wahls, H.E.: Consolidation under constant rates of strain, ASCE 95, pp. 519-539, 1969

Smoltczyk, U.: Grundbau – Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und techn. Wissen, 8. Auflage, 2008

Soumaya, B., Kempfert, H.G.: Bewertung von Setzungsmessungen flachgegründeter Gebäude in weichen Böden, Bautechnik 83, Heft 3, 2006

Soumaya, B., Kempfert, H.G.: Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch, Bautechnik 87, Heft 2, 2010

Soumaya, B.: Setzungsverhalten von Flachgründungen in normalkonsolidierten bindigen Böden, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 16, Februar 2005

Steinmann, B.: Zum Verhalten bindiger Böden bei monotoner einaxialer Beanspruchung, Mitteilung Institut für Geotechnik Stuttgart, Mitteilung 26, 1985

Taylor, D.W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 1948

Terzaghi, Karl.: Erdbaumechanik, Deuticke Verlag, Wien, 1925

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, pp. 236-256, 1986

Wissa, A.E.Z., et.al.: Consolidation at constant rate of strain, ASCE 97, pp.1393-1413, 1971

Wu, W.: Bodenmechanik und Grundbau – Studienunterlagen zur Vorlesung, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Geotechnik, 2012

Wu, W.: Laboratoriumsübungen zu Geotechnik II – Studienunterlagen zur Übung, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Geotechnik, 2010



## 7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Diagramm eines IL-Versuches .....	3
Abbildung 2: Links: ML-Versuch mit konstanter Spannungsrate (CRL); Rechts: ML-Versuch mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit (CRS) .....	3
Abbildung 3: Links:vollautomatische Kompressionsgeräte; Rechts: Ödometer nach Terzaghi im Erdbaulaboratorim der TU Wien .....	4
Abbildung 4: Kompressionsgerät mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung und automatischer Messewerterfassung der Fa. WILLE .....	6
Abbildung 5: Vollautomatisches Triaxialgerät der Fa. WILLE.....	7
Abbildung 6: Dreiphasensystem des Bodens unter Aufbringung einer Flächenlast (Adam, 2016).....	8
Abbildung 7: Spannungszustand bei Kompressionsversuchen mit verhinderter Seitendehnung.....	9
Abbildung 8: Verformung im Standard-Ödometerversuch.....	10
Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm zur Definition des Steifemoduls .....	12
Abbildung 10: Ermittlung der Verformungsbeiwerte im Druck-Porenzahl- Diagramm (Soumaya, 2005).....	13
Abbildung 11: Anteile der Zeit-Setzungskurve an der Gesamtsetzung (ÖNORM B 4420) .....	15
Abbildung 12: Schema eines Kompressionsgerätes mit starrer Druckplatte, zentrischer Lasteintragung und feststehendem Ring (ÖNORM B 4420).....	20
Abbildung 13: Schema eines Kompressionsgerätes mit starrer Druckplatte, zentrischer Lasteintragung und schwebendem Ring (ÖNORM B 4420) .....	20
Abbildung 14: Ödometer nach Terzaghi (1925).....	21
Abbildung 15: Einheitswürfel vor, nach und während des Kompressionsversuches (Adam, 2016).....	22
Abbildung 16: Druck-Zusammendrückungs-Diagramm im linearen Maßstab (ÖNORM B 4420) .....	25
Abbildung 17: Ermittlung des Tangentenmoduls (ÖNORM B 4420) .....	26

Abbildung 18: Ermittlung des Sekantenmoduls (ÖNORM B 4420) .....	26
Abbildung 19: Ermittlung des Kompressionsbeiwertes $C_c$ (ÖNORM B 4420) .....	28
Abbildung 20: Ermittlung des Schwellbeiwertes $C_s$ (ÖNORM B 4420).....	28
Abbildung 21: Druck-Porenzahl-Diagramm unterschiedlicher Böden.....	29
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Stauchung bei einer Laststufe im linearen Maßstab (ÖNORM B 4420) .....	30
Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Stauchung bei einer Laststufe im halblogarithmischen Maßstab (ÖNORM B 4420) .....	31
Abbildung 24: Untersucher Boden "Wiener Tegel" .....	32
Abbildung 25: Kornverteilungslinie der verwendeten Bodenprobe „Wiener Tegel“ .....	34
Abbildung 26: Skizze des Ödometers nach Terzaghi (1925) .....	36
Abbildung 27: Prüfstand mit Ödometern nach Terzaghi (1925) im Erdbaulaboratorium TU Wien .....	37
Abbildung 28: Ödometer nach Terzaghi (1925) mit zwei Messuhren .....	38
Abbildung 29: Kompressionsgerätstand mit elektronisch gesteuerter Lastaufbringung im Erdbaulaboratorium der TU Wien .....	41
Abbildung 30: Gerätebeschreibung des Kompressionsgerätes der Fa. Wille .....	41
Abbildung 31: Einbau der Bodenprobe in den Probenring .....	42
Abbildung 32: Edelstahl- Ödometer mit eingebautem Ausstechring .....	43
Abbildung 33: Exemplarische Darstellung des Standardversuches nach ÖNORM B 4420.....	43
Abbildung 34: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit Nachbildung der Laststufen mit abschnittweisen, konstanten Belastungsraten .....	45
Abbildung 35: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten.....	47
Abbildung 36: Empfohlene Belastungsrate in Abhängigkeit der Fließgrenze nach Von Fay (1986) .....	49
Abbildung 37: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m <sup>2</sup> /h.....	49

Abbildung 38: Exemplarische Darstellung des CRL-Versuches mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m <sup>2</sup> /h.....	51
Abbildung 39: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 1) .....	53
Abbildung 40: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 1) .....	54
Abbildung 41: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 1).....	55
Abbildung 42: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 2) .....	56
Abbildung 43: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 2) .....	57
Abbildung 44: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 2).....	58
Abbildung 45: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 3) .....	59
Abbildung 46: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 3) .....	60
Abbildung 47: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 3).....	61
Abbildung 48: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 4) .....	62
Abbildung 49: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 4) .....	63
Abbildung 50: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 4).....	64
Abbildung 51: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 5) .....	65
Abbildung 52: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 5) .....	66
Abbildung 53: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 5).....	67
Abbildung 54: Steifemodul der Erstbelastung (Versuchsreihe 6) .....	68
Abbildung 55: Steifemodul der Wiederbelastung (Versuchsreihe 6) .....	69
Abbildung 56: Druck-Verformungslinie (Versuchsreihe 6).....	70
Abbildung 57: Mittelwert der Steifemoduln der Erstbelastung der einzelnen Versuchsreihen.....	72
Abbildung 58: Mittelwert der Steifemoduln der Wiederbelastung der einzelnen Versuchsreihen.....	73
Abbildung 59: Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen .....	75
Abbildung 60: Normiertes Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen.....	77
Abbildung 61: Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen bei Erstbelastung .....	77

Abbildung 62: Druck-Porenzahl-Diagramm der Mittelwerte der Versuchsreihen bei Wiederbelastung .....	78
Abbildung 63: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 2) .....	80
Abbildung 64: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 2 (Versuchsreihe 2) .....	80
Abbildung 65: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 2) .....	81
Abbildung 66: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 4 (Versuchsreihe 2) .....	81
Abbildung 67: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 8 (Versuchsreihe 2) .....	82
Abbildung 68: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 9 (Versuchsreihe 2) .....	82
Abbildung 69: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 10 (Versuchsreihe 2) .....	83
Abbildung 70: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 11 (Versuchsreihe 2) .....	83
Abbildung 71: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 12 (Versuchsreihe 2) .....	84
Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung bei Erstbelastung aller Laststufen .....	85
Abbildung 73: Zeitlicher Verlauf der Zeit-Setzung der Wiederbelastung aller Laststufen (Versuchsreihe 2) .....	85
Abbildung 74: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 3) .....	86
Abbildung 75: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 2 (Versuchsreihe 3) .....	86
Abbildung 76: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 3) .....	87
Abbildung 77: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 4 (Versuchsreihe 3) .....	87
Abbildung 78: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 8 (Versuchsreihe 3) .....	88
Abbildung 79: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 9 (Versuchsreihe 3) .....	88
Abbildung 80: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 10 (Versuchsreihe 3) .....	89
Abbildung 81: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 11 (Versuchsreihe 3) .....	89
Abbildung 82: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 12 (Versuchsreihe 3) .....	90
Abbildung 83: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 4) .....	91
Abbildung 84: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 4) .....	92
Abbildung 85: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 5) .....	93
Abbildung 86: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 5) .....	94
Abbildung 87: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 1 (Versuchsreihe 6) .....	95

Abbildung 88: Zeit-Setzungsverlauf bei Belastungsstufe 3 (Versuchsreihe 6).....	96
Abbildung 89: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 1.....	97
Abbildung 90: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 2.....	97
Abbildung 91: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 3.....	98
Abbildung 92: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 4.....	98
Abbildung 93: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 8.....	99
Abbildung 94: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 9.....	99
Abbildung 95: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe10.....	100
Abbildung 96: Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 11.....	100
Abbildung 97:Vergleich des Zeit-Setzungsverlaufes bei Belastungsstufe 12.....	101

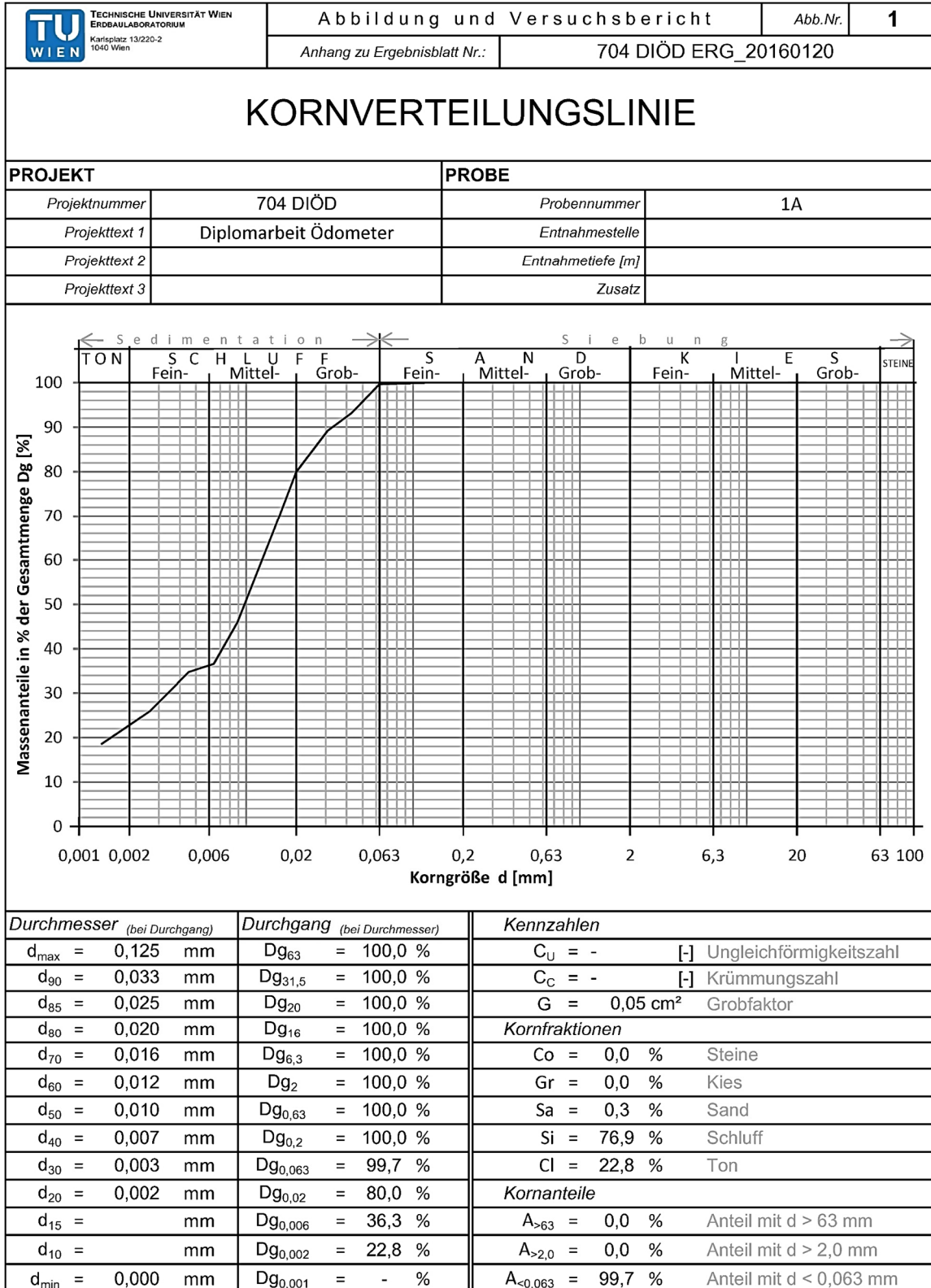
## 8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kompressionsbeiwerte $C_c$ von bindigen Böden .....	14
Tabelle 2: Anhaltswerte für den Erstbelastungsmodul $E_{s1}$ .....	27
Tabelle 3: Zustandsgrenzen nach Atterberg.....	33
Tabelle 4: Übersichtstabelle der durchgeführten Versuche.....	35
Tabelle 5: Versuchsablauf des Standard-Ödometerversuches im mechanischen Kompressionsgerät.....	39
Tabelle 6: Versuchsablauf des Standard-Ödometerversuches im vollautomatischen Kompressionsgerät .....	44
Tabelle 7: Versuchsablauf des CRL-Versuches mit Nachbildung der Laststufen des Standardversuches mit abschnittsweiser, konstanter Belastungsrate.....	46
Tabelle 8: CRL-Versuch mit Nachbildung des gesamten Standardversuches mit konstanten Belastungsraten .....	48
Tabelle 9: CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 45 kN/m <sup>2</sup> /h.....	50
Tabelle 10: CRL-Versuch mit einer konstanten Belastungsrate von 22,5 kN/m <sup>2</sup> /h .....	51
Tabelle 11: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 1).....	54
Tabelle 12: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 1).....	54
Tabelle 13: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 2).....	56
Tabelle 14: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 2).....	57
Tabelle 15: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 3).....	59
Tabelle 16: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 3).....	60
Tabelle 17: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 4).....	62
Tabelle 18: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 4).....	63
Tabelle 19: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 5).....	65
Tabelle 20: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 5).....	66
Tabelle 21: Berechnete Steifemoduln der Erstbelastung (Versuchsreihe 6).....	68
Tabelle 22: Berechnete Steifemoduln der Wiederbelastung (Versuchsreihe 6).....	69

Tabelle 23: Kompressionsbeiwert und Schwellbeiwert der einzelnen Versuche.....	71
Tabelle 24: Berechnete Mittelwerte der Steifemoduln der einzelnen Versuchsreihen der Erstbelastung.....	72
Tabelle 25: Berechnete Mittelwerte der Steifemoduln der einzelnen Versuchsreihen der Wiederbelastung.....	73
Tabelle 26: Bodenkennwerte vor und nach dem Versuch .....	76
Tabelle 27: Mittelwerte der Kompressions- und Schwellbeiwerte .....	78

# ANHANG

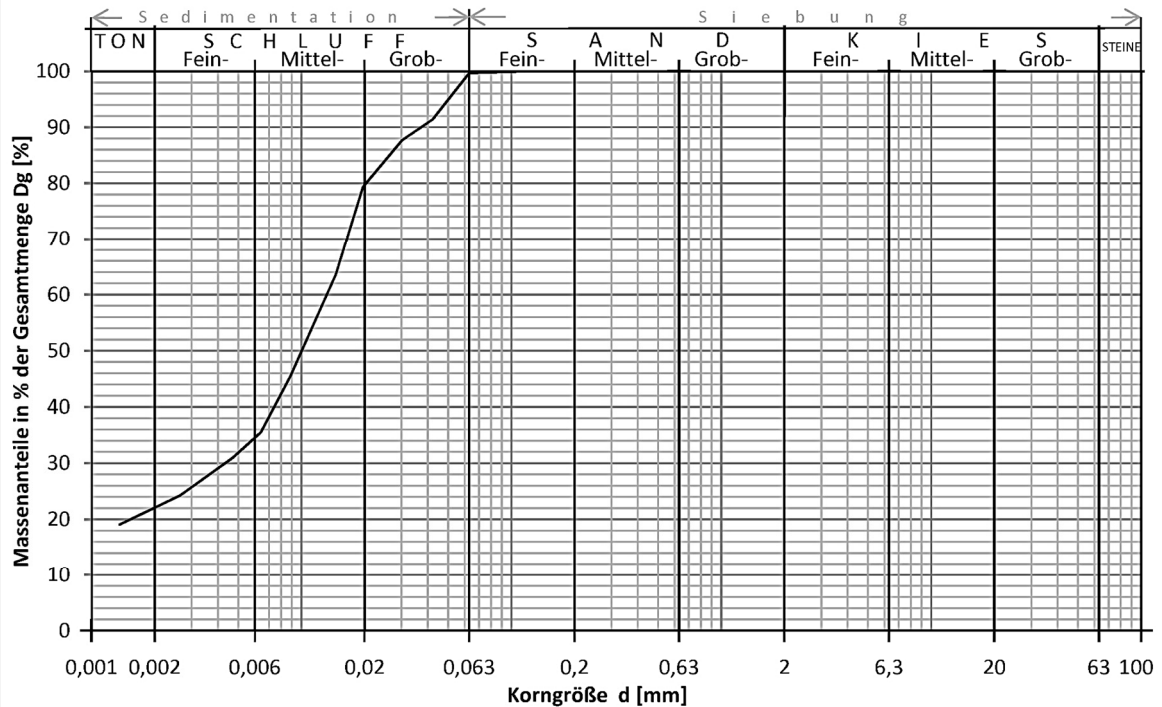
## Prüfprotokolle Kornverteilung





# KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	1B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



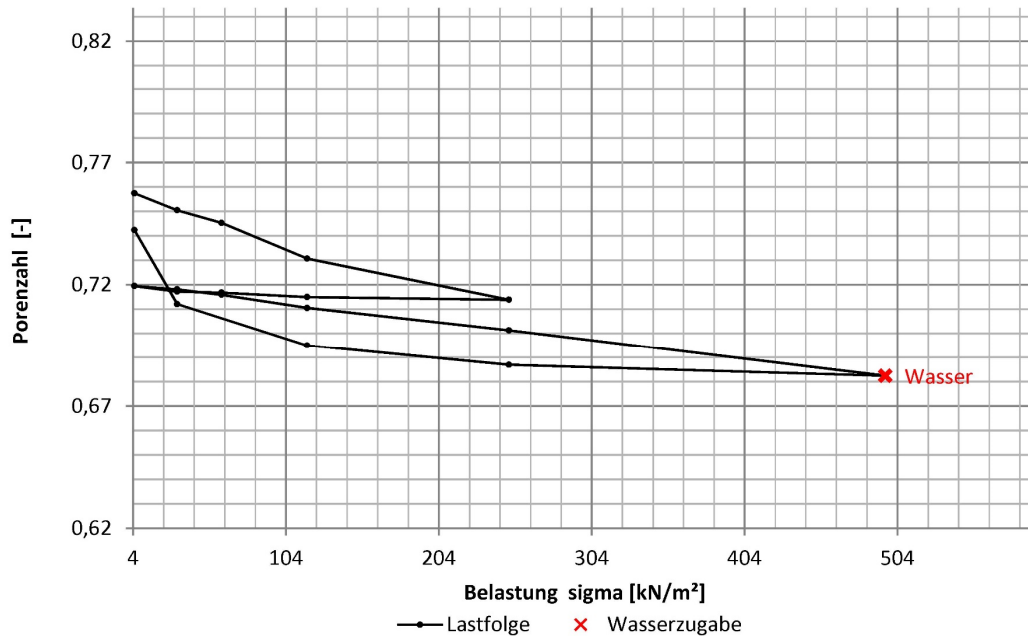
Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 0,125$ mm	$Dg_{63} = 100,0$ %	$C_U = -$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 0,037$ mm	$Dg_{31,5} = 100,0$ %	$C_C = -$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 0,026$ mm	$Dg_{20} = 100,0$ %	$G = 0,04$ cm <sup>2</sup> Grobfaktor
$d_{80} = 0,020$ mm	$Dg_{16} = 100,0$ %	<b>Kornfraktionen</b>
$d_{70} = 0,016$ mm	$Dg_{6,3} = 100,0$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 0,013$ mm	$Dg_2 = 100,0$ %	$Gr = 0,0$ % Kies
$d_{50} = 0,010$ mm	$Dg_{0,63} = 100,0$ %	$Sa = 0,3$ % Sand
$d_{40} = 0,007$ mm	$Dg_{0,2} = 100,0$ %	$Si = 77,6$ % Schluff
$d_{30} = 0,004$ mm	$Dg_{0,063} = 99,7$ %	$Cl = 22,1$ % Ton
$d_{20} = 0,002$ mm	$Dg_{0,02} = 79,7$ %	<b>Kornanteile</b>
$d_{15} =$ mm	$Dg_{0,006} = 34,5$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} =$ mm	$Dg_{0,002} = 22,1$ %	$A_{>2,0} = 0,0$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 99,7$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

# Prüfprotokolle Kompressionsversuch

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN ERDBAULABORATORIUM Karlsplatz 13/220-2 1040 Wien	Abbildung und Versuchsbericht		Abb.Nr.	<b>6</b>
	Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		704 DIÖD ERG_20160120	

## KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	1A
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



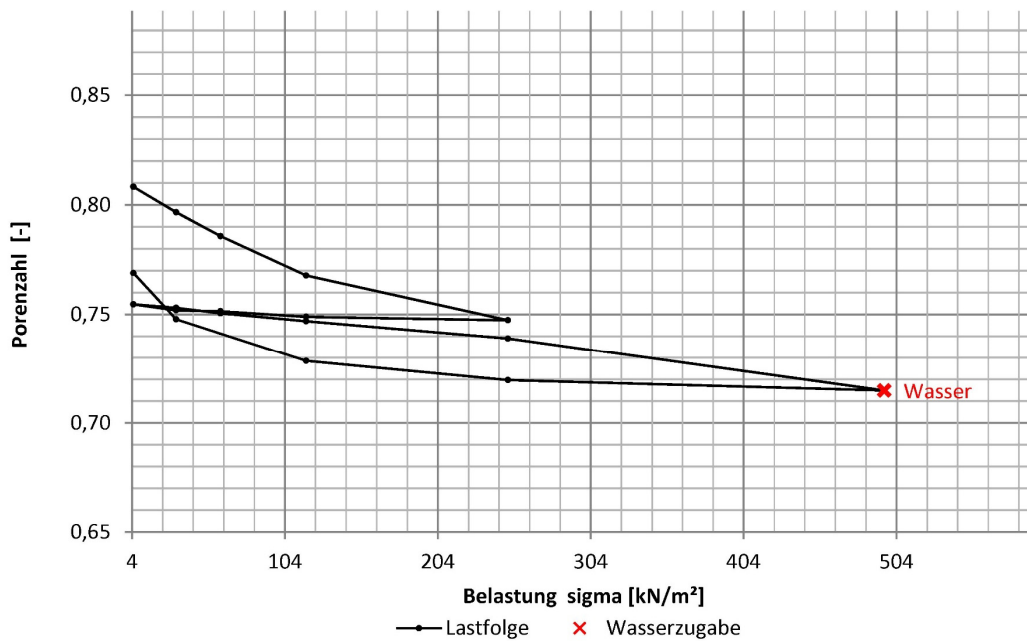
Steifemodul $E_{oed}^{*)}$	
Erstbelastung	$E_{oed1} = 13,8 \text{ MN/m}^2$ berechnet zwischen $\sigma = 118 - 250 \text{ kN/m}^2$
Zweitbelastung	$E_{oed2} = 25,3 \text{ MN/m}^2$ berechnet zwischen $\sigma = 118 - 250 \text{ kN/m}^2$

Belastung		Tabelle Steifemodul $E_{oed}^{*)}$												
1	$\sigma$ [kN/m²]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	7,1	9,9	6,8	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m²]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	36,6	22,8	18,3	25,3	23,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Entlastung														
1	$\sigma$ [kN/m²]	250	118	62	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	207,2	54,9	113,8	22,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m²]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	96,4	28,8	8,8	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	1B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung	$E_{oed1} = 11,7 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 118 - 250 \text{ kN/m}^2$
Zweitbelastung	$E_{oed2} = 30,0 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 118 - 250 \text{ kN/m}^2$

Belastung

Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		4,4	4,8	5,6	11,7	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		31,8	21,0	27,9	30,0	18,5	-	-	-	-	-	-	-

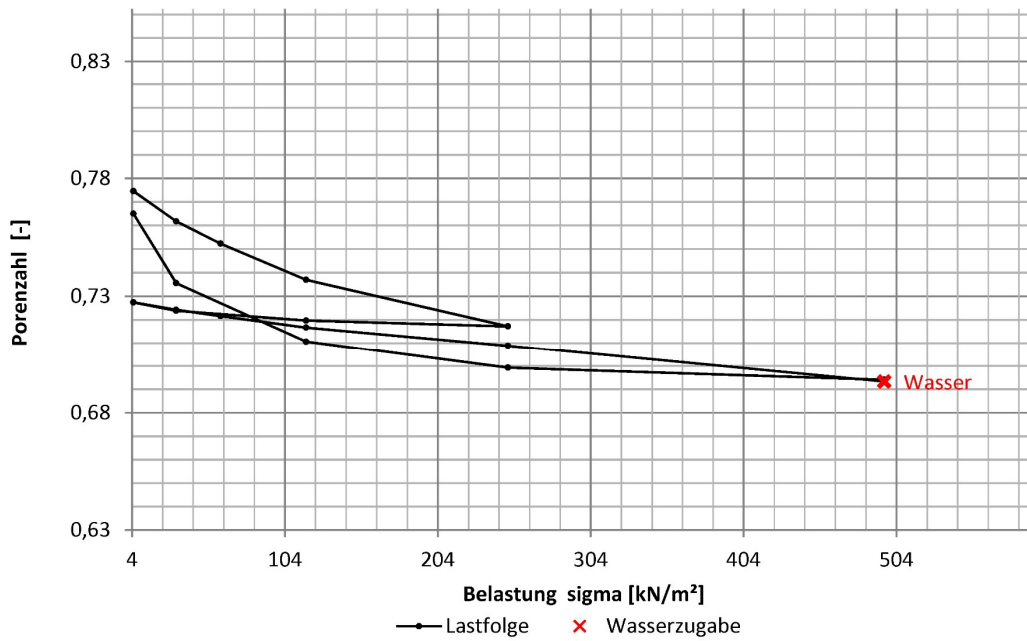
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	62	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		150,1	40,5	115,4	18,6	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		93,1	26,9	8,0	2,4	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	2A
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 11,8 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 30,2 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	3,9	5,5	6,5	11,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	15,7	19,3	20,3	30,2	28,2	-	-	-	-	-	-	-	-

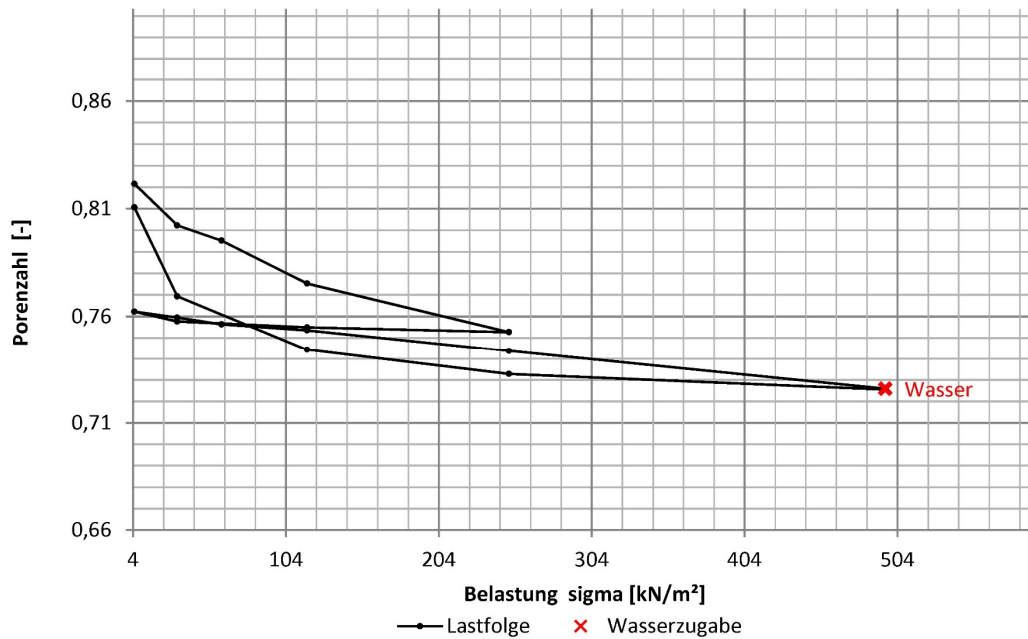
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	93,9	36,4	13,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	84,7	20,7	6,1	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	2B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^*)$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 10,6 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 24,5 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^*)$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	2,6	7,5	5,1	10,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	17,9	16,8	36,5	24,5	25,2	-	-	-	-	-	-	-	-

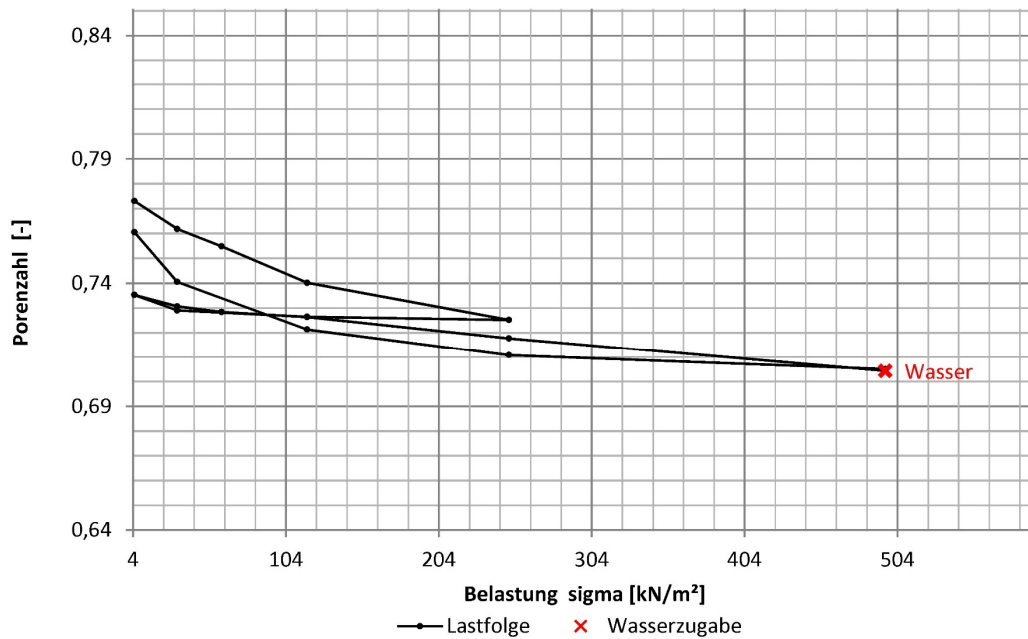
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	108,9	56,3	11,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	61,1	20,9	6,2	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	2C
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 15,7 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 27,2 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	4,4	7,4	6,8	15,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	10,9	22,5	48,6	27,2	32,7	-	-	-	-	-	-	-	-

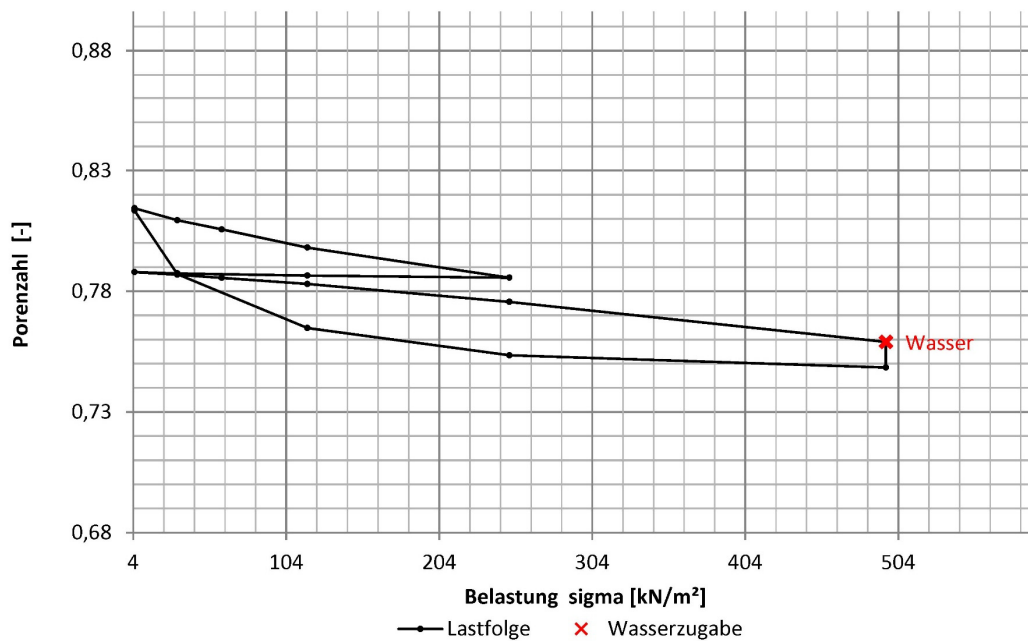
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	184,9	58,5	8,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	76,5	22,2	7,9	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	3A
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 15,3 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 26,5 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	10,2	14,0	13,5	19,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	45,4	41,6	40,0	32,3	26,9	-	-	-	-	-	-	-	-

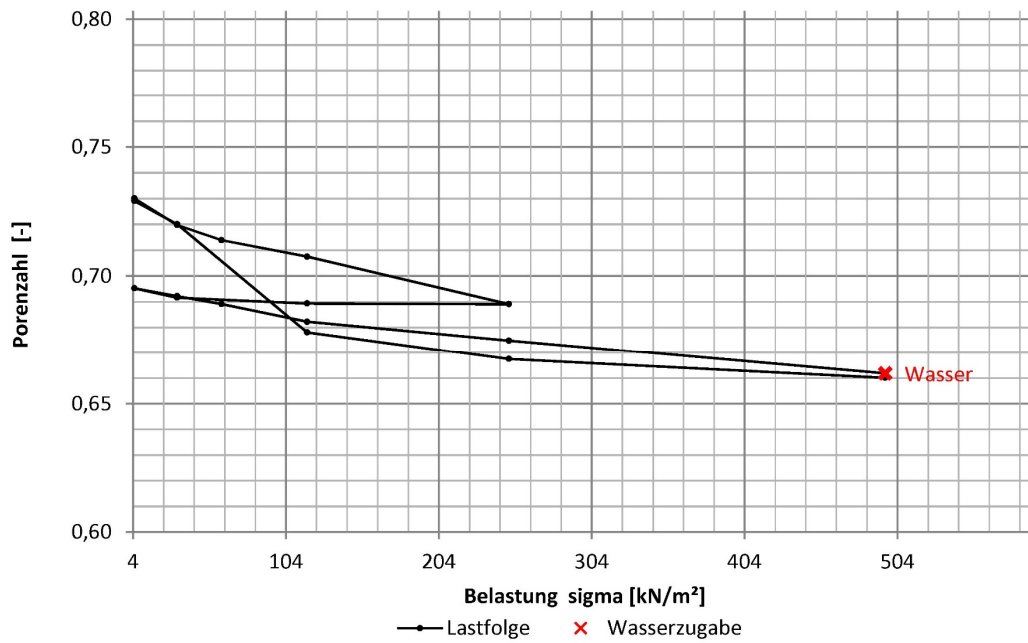
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	277,1	176,9	86,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	88,5	21,2	6,9	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	3B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 12,4 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 31,0 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	4,7	8,6	15,2	12,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	15,9	16,4	14,1	31,0	32,7	-	-	-	-	-	-	-	-

Entlastung

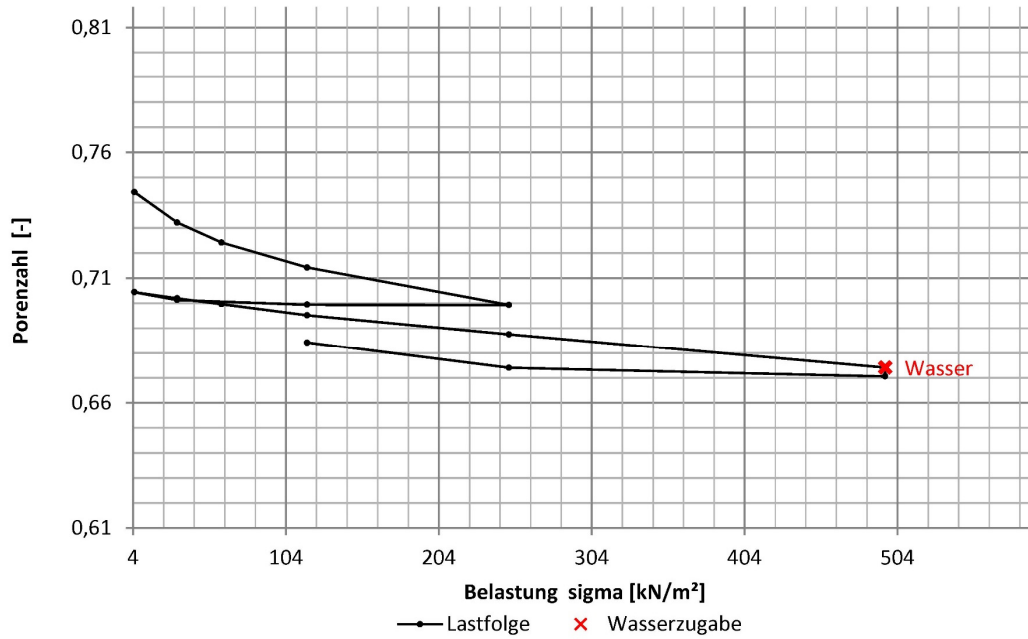
1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	899,2	65,4	13,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	57,7	21,6	3,5	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen



# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	3C
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



### Steifemodul $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 15,4 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 30,1 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

### Belastung Tabelle Steifemodul $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	4,0	6,4	9,8	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	19,7	21,9	21,9	30,1	31,8	-	-	-	-	-	-	-	-

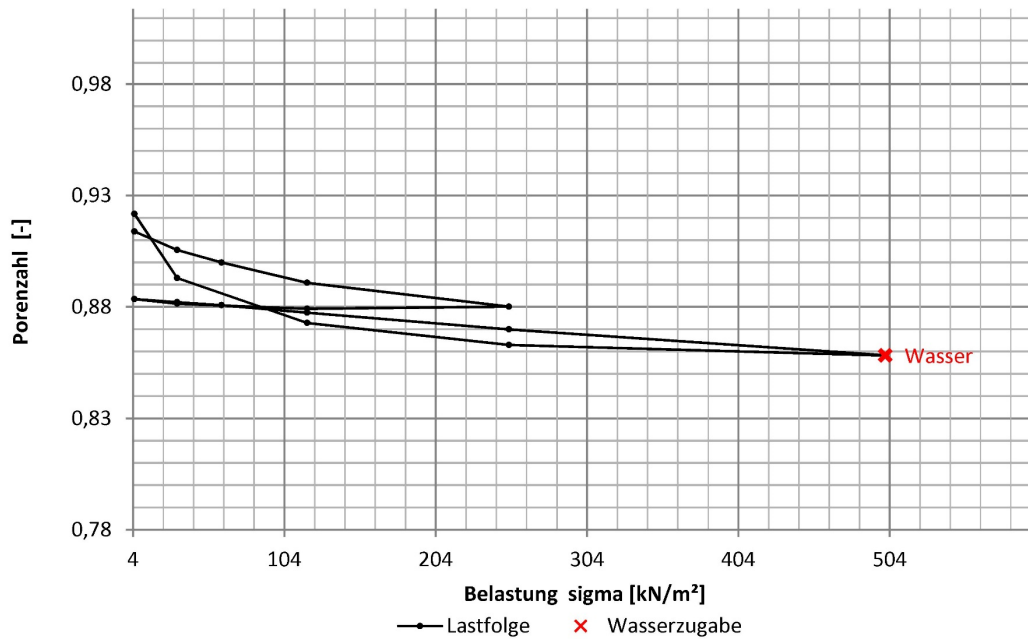
### Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	2704,0	78,7	15,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	122,5	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	3D_K0
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 23,9 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 119 - 252 \text{ kN/m}^2$

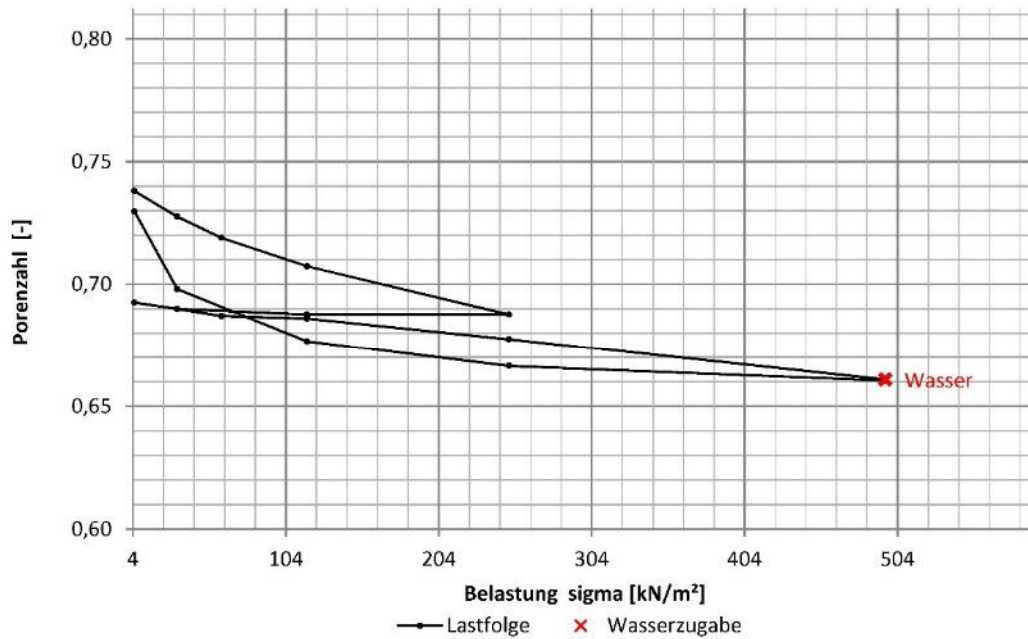
Zweitbelastung  $E_{oed2} = 34,1 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 119 - 252 \text{ kN/m}^2$

Belastung		Tabelle Steifemodul $E_{oed}^{*)}$											
1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,0515	33,34	62,639	119,22	252,58	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	6,5	10,0	11,9	23,9	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,0515	33,34	62,639	119,22	252,58	501,11	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	38,6	41,3	32,3	34,1	41,1	-	-	-	-	-	-	-
Entlastung													
1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	252,58	119,22	33,34	5,0515	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	-273,4	72,2	26,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	501,11	252,58	119,22	33,34	5,0515	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	100,6	25,9	8,2	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	4A
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 11,7 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 27,0 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	4,7	5,8	8,4	11,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	18,6	17,3	95,2	27,0	25,8	-	-	-	-	-	-	-	-

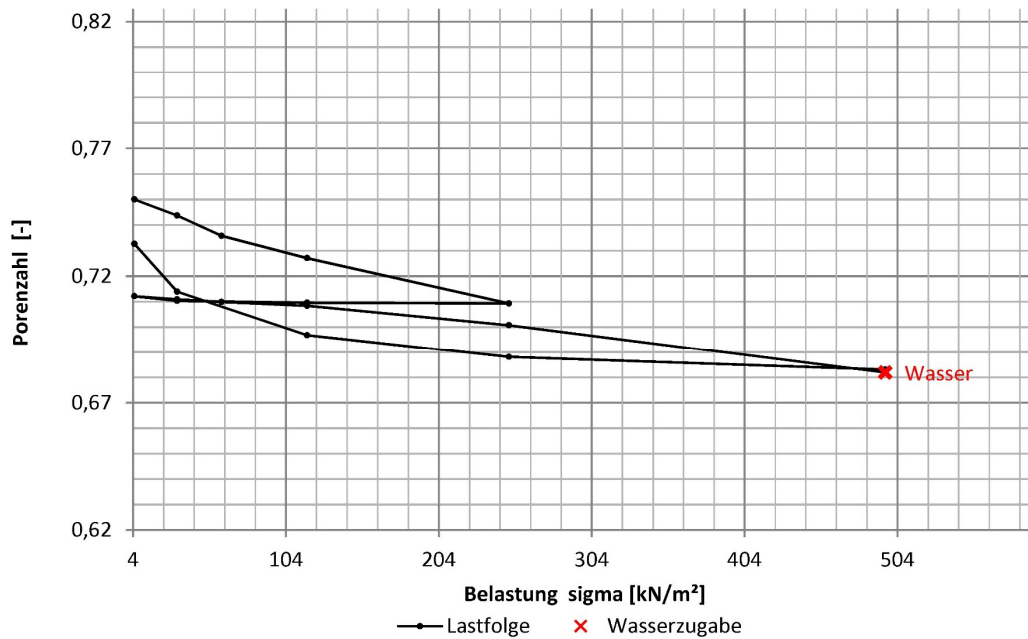
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	19266,1	64,8	18,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	71,6	22,6	6,9	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	4B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 13,0 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 30,2 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	7,8	6,4	11,3	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	41,2	49,1	64,5	30,2	22,9	-	-	-	-	-	-	-	-

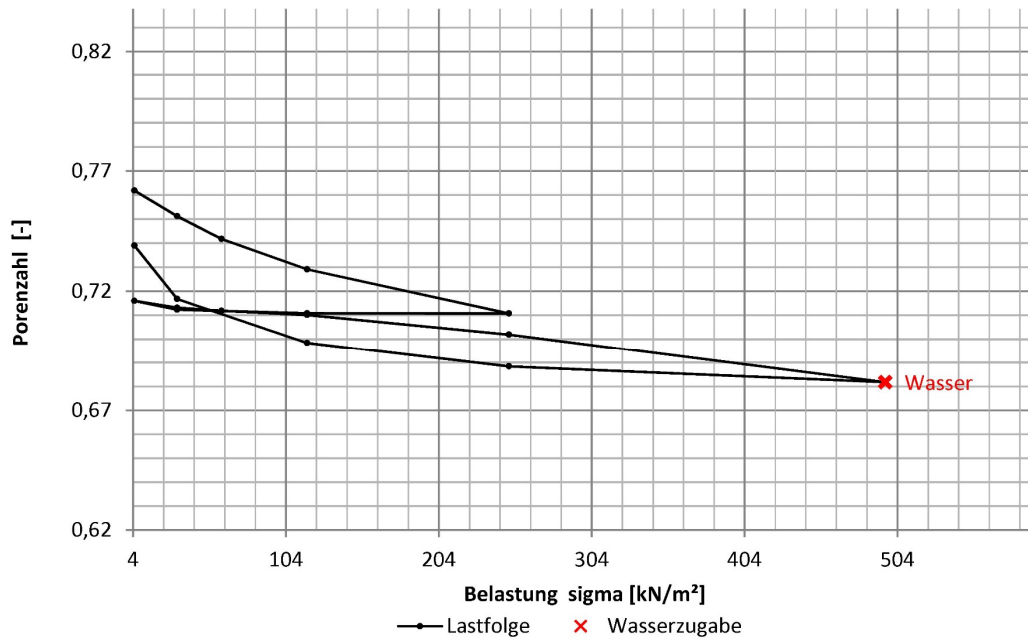
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	824,0	190,9	27,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	85,8	26,5	8,7	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	4C
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 12,6 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 28,3 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	4,6	5,4	7,8	12,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	496	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	17,2	40,7	56,0	28,3	21,5	-	-	-	-	-	-	-	-

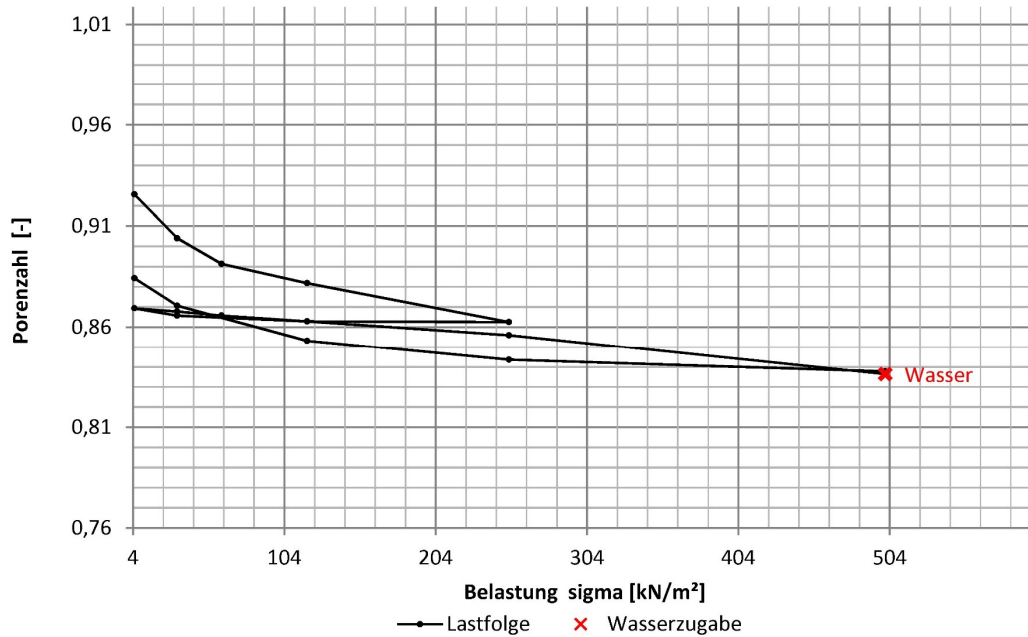
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	2838,8	98,5	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	496	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	65,6	23,2	8,1	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	4D_K0
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 13,4 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 119 - 252 \text{ kN/m}^2$

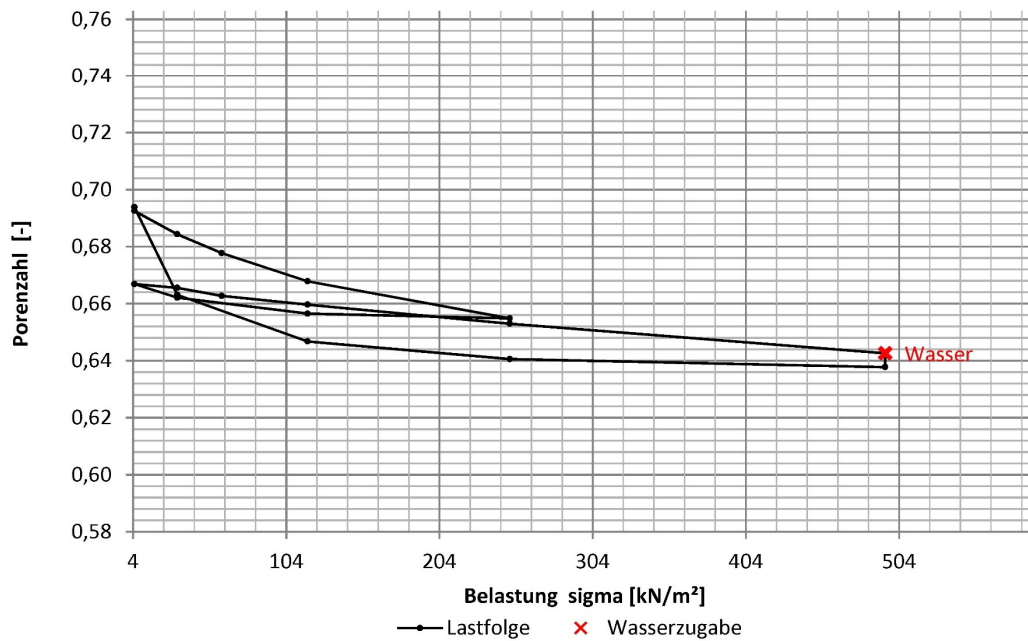
Zweitbelastung  $E_{oed2} = 37,1 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 119 - 252 \text{ kN/m}^2$

Belastung		Tabelle Steifemodul $E_{oed}^{*)}$											
1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,0515	33,34	62,639	119,22	252,58	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		2,5	4,5	11,5	13,4	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,0515	33,34	62,639	119,22	252,58	501,11	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		33,9	28,5	38,2	37,1	24,5	-	-	-	-	-	-
Entlastung													
1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	252,58	119,22	33,34	5,0515	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		759,7	59,1	14,9	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	501,11	252,58	119,22	33,34	5,0515	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		82,2	26,8	9,5	4,0	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	5A
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 17,2 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 33,3 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	5,8	7,4	9,6	17,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	495	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	35,9	17,4	30,8	33,3	39,9	-	-	-	-	-	-	-	-

Entlastung

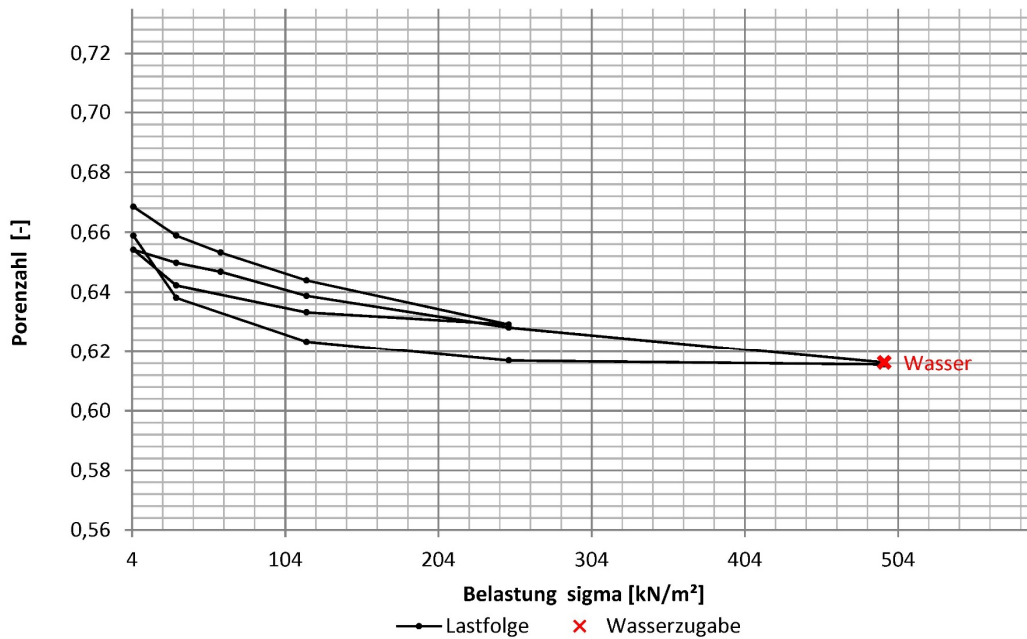
1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	133,6	25,7	9,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	495	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	145,9	36,1	8,8	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen



## KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	5B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul $E_{oed}^{*)}$	
Erstbelastung	$E_{oed1} = 14,9 \text{ MN/m}^2$ berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$
Zweitbelastung	$E_{oed2} = 20,7 \text{ MN/m}^2$ berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung		Tabelle Steifemodul $E_{oed}^{*)}$												
1	$\sigma$ [kN/m²]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	4,8	8,5	10,1	14,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m²]	5	33	62	118	250	495	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	10,7	16,3	11,6	20,7	34,2	-	-	-	-	-	-	-	-

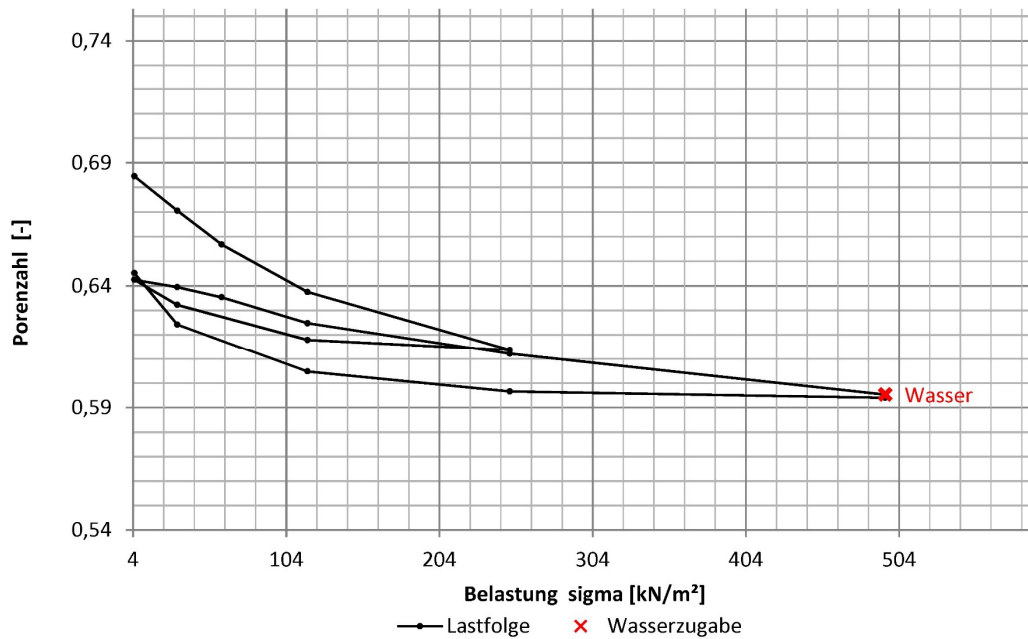
Entlastung		Tabelle Steifemodul $E_{oed}^{*)}$												
1	$\sigma$ [kN/m²]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	53,9	15,8	3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m²]	495	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m²]	303,4	33,9	9,6	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen



# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	5C
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung	$E_{oed1} = 9,4 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$
Zweitbelastung	$E_{oed2} = 17,7 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		3,4	3,6	4,9	9,4	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	495	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		15,9	11,8	8,9	17,7	24,6	-	-	-	-	-	-	-

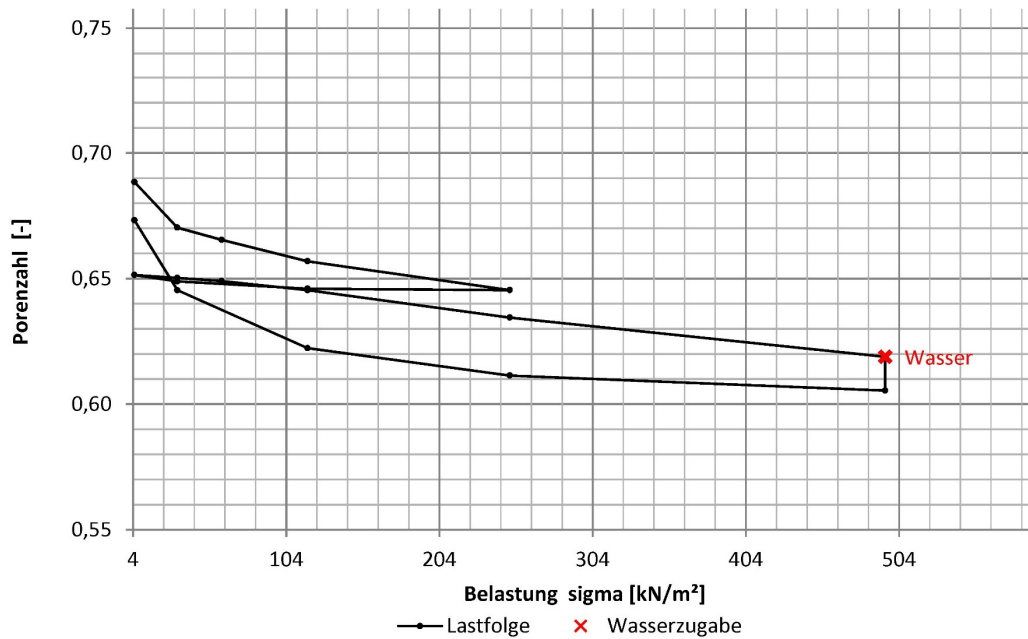
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		53,5	10,0	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	495	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		159,9	27,1	7,4	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	6A
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung	$E_{oed1} = 19,5 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$
Zweitbelastung	$E_{oed2} = 20,4 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung      Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		2,6	10,1	11,1	19,5	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	495	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		40,6	39,0	26,3	20,4	26,6	-	-	-	-	-	-	-

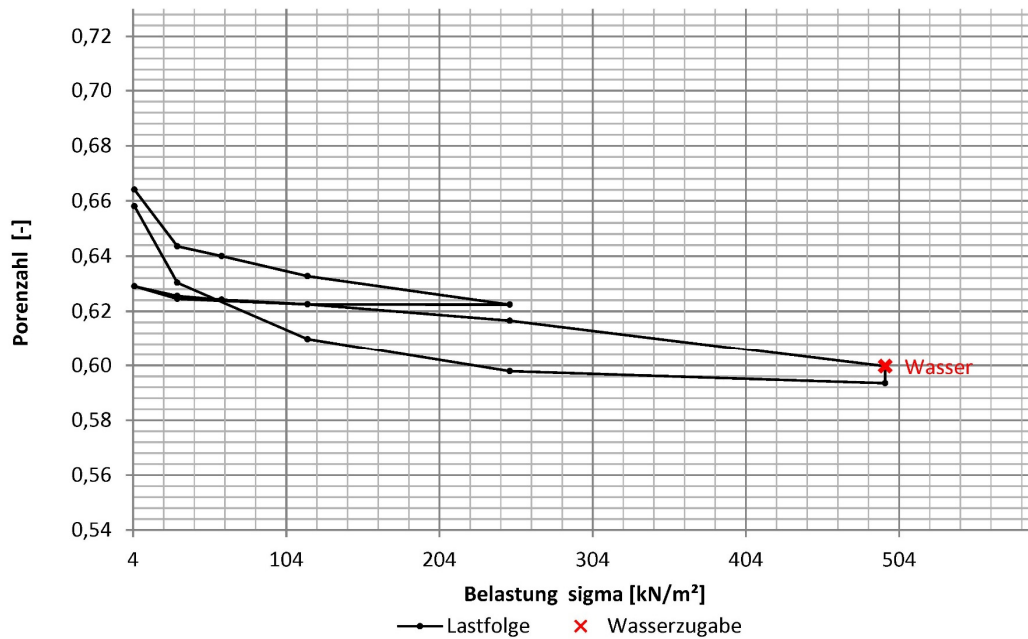
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		405,0	49,2	18,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	495	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		69,3	20,5	6,2	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	6B
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung	$E_{oed1} = 21,2 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$
Zweitbelastung	$E_{oed2} = 36,8 \text{ MN/m}^2$	berechnet zwischen $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung

Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		2,3	13,5	12,8	21,2	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	495	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		13,1	36,3	55,8	36,8	24,1	-	-	-	-	-	-	-

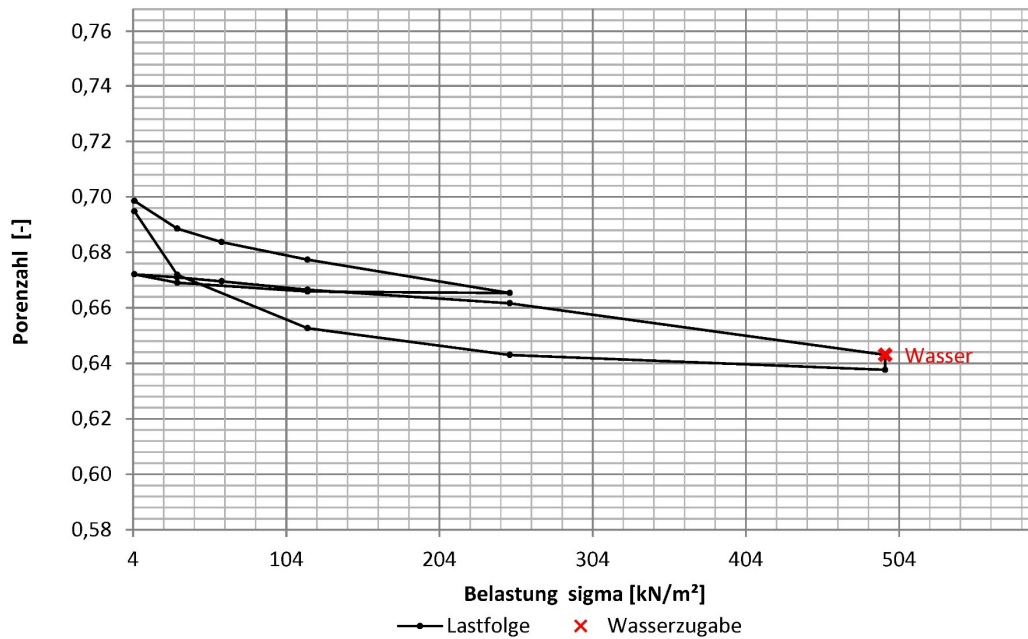
Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		2607,2	70,1	10,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	495	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		92,4	18,3	6,9	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# KOMPRESSIONSVERSUCH

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	704 DIÖD	Probennummer	6C
Projekttext 1	Diplomarbeit Ödometer	Entnahmestelle	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$

Erstbelastung  $E_{oed1} = 18,6 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Zweitbelastung  $E_{oed2} = 45,6 \text{ MN/m}^2$  berechnet zwischen  $\sigma = 117 - 249 \text{ kN/m}^2$

Belastung Tabelle Steifemodul  $E_{oed}^{*)}$


1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	4,7	10,1	15,1	18,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	33	62	118	250	495	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	44,5	33,8	31,5	45,6	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-

Entlastung

1	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	422,2	45,4	15,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	495	250	118	33	5	-	-	-	-	-	-	-	-
	$E_{oed}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	77,5	23,2	7,5	2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*)</sup> Berechnet als Sekantenmodul zwischen den jeweiligen Laststufen

# Ergebnisblätter der bodenphysikalischen Untersuchung

 <b>TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN</b> <b>ERDBAULABORATORIUM</b> Karlsplatz 13/220-2 1040 Wien			Projekt:		
			<b>Diplomarbeit Ödometer</b>		
			Projektnummer: 704 DIÖD		
			Datum: 20.01.2016		
<b>ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN</b>					
<b>PROBENDATEN</b>					
Probennummer			1A	1B	2A
Entnahmestelle			-	-	-
Entnahmetiefe		[m]	-	-	-
<b>WASSERGEHALT</b>					
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	24,9	24,9	25,1
<b>KONSISTENZ</b>					
Fließgrenze	$w_L$	[%]	-	43,0	42,5
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	-	27,0	27,5
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	-	16,0	15,0
<b>DICHTE</b>					
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Porenanteil	$n$	[-]	-	-	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-	-	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-	-	-
<b>KORNVERTEILUNG</b>			Abb. 1	Abb. 2	
Steine	$C_o$	[%]	0,0	0,0	-
Kies	$Gr$	[%]	0,0	0,0	-
Sand	$Sa$	[%]	0,3	0,3	-
Schluff	$Si (Si+Cl)$	[%]	76,9	77,6	-
Ton	$Cl (-)$	[%]	22,8	22,1	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt					
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-	-	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-	-	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	0,0	0,0	-
<b>KOMPRESSIONSVERSUCH</b>			Abb. 6	Abb. 7	Abb. 3
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	13,8	11,7	15,3
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	118 - 250	118 - 250	117 - 249
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	25,3	30,0	26,5
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	118 - 250	118 - 250	117 - 249



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**  
**ERDBAULABORATORIUM**

Karlsplatz 13/220-2  
1040 Wien

Projekt:

**Diplomarbeit Ödometer**

-  
-

Projektnummer:

704 DIÖD

Datum:

20.01.2016

## ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

PROBENDATEN					
Probennummer			2B	2C	3A
Entnahmestelle			-	-	-
Entnahmetiefe	[m]		-	-	-
WASSERGEHALT					
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	25,0	29,4	25,5
KONSISTENZ					
Fließgrenze	$w_L$	[%]	42,5	-	-
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	28,0	-	-
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	14,5	-	-
DICHTE					
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	2,78
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Porenanteil	$n$	[-]	-	-	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-	-	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-	-	-
KORNVERTEILUNG					
Steine	$C_o$	[%]	-	-	-
Kies	$Gr$	[%]	-	-	-
Sand	$Sa$	[%]	-	-	-
Schluff	$Si$ (Si+Cl)	[%]	-	-	-
Ton	$Cl$ (-)	[%]	-	-	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt					
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-	-	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-	-	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	-	-	-
KOMPRESSIONSVERSUCH			Abb. 4	Abb. 5	Abb. 8
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	10,5	15,3	-
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	-
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	24,4	26,5	-
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	-



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**  
**ERDBAULABORATORIUM**  
 Karlsplatz 13/220-2  
 1040 Wien

Projekt:

**Diplomarbeit Ödometer**

Projektnummer:

704 DIÖD

Datum:

20.01.2016

## ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

PROBENDATEN					
Probennummer			3B	3C	3D_K0
Entnahmestelle			-	-	-
Entnahmetiefe	[m]		-	-	-
WASSERGEHALT					
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	25,5	25,4	25,1
KONSISTENZ					
Fließgrenze	$w_L$	[%]	-	-	-
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	-	-	-
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	-	-	-
DICHTE					
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,75	2,78	2,74
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Porenanteil	$n$	[-]	-	-	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-	-	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-	-	-
KORNVERTEILUNG					
Steine	$C_o$	[%]	-	-	-
Kies	$C_r$	[%]	-	-	-
Sand	$C_a$	[%]	-	-	-
Schluff	$C_{Si}$ (Si+Cl)	[%]	-	-	-
Ton	$C_l$ (-)	[%]	-	-	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt					
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-	-	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-	-	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	-	-	-
KOMPRESSIONSVERSUCH			Abb. 9	Abb. 10	Abb. 14
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	12,4	16,0	21,7
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	119 - 252
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	31,1	31,1	31,0
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	119 - 252



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**  
**ERDBAULABORATORIUM**

Karlsplatz 13/220-2  
1040 Wien

Projekt:

**Diplomarbeit Ödometer**

-  
-

Projektnummer:

704 DIÖD

Datum:

20.01.2016

## ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

PROBENDATEN					
Probennummer			4A	4B	4C
Entnahmestelle			-	-	-
Entnahmetiefe	[m]		-	-	-
WASSERGEHALT					
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	25,4	24,9	25,0
KONSISTENZ					
Fließgrenze	$w_L$	[%]	-	-	-
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	-	-	-
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	-	-	-
DICHTE					
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,76	2,77	2,78
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Porenanteil	$n$	[-]	-	-	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-	-	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-	-	-
KORNVERTEILUNG					
Steine	$C_o$	[%]	-	-	-
Kies	$Gr$	[%]	-	-	-
Sand	$Sa$	[%]	-	-	-
Schluff	$Si$ (Si+Cl)	[%]	-	-	-
Ton	$Cl$ (-)	[%]	-	-	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt					
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-	-	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-	-	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	-	-	-
KOMPRESSIONSVERSUCH			Abb. 11	Abb. 12	Abb. 13
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	11,6	12,8	12,6
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	117 - 249
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	26,9	29,6	28,2
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	117 - 249





**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**  
**ERDBAULABORATORIUM**

Karlsplatz 13/220-2  
1040 Wien

Projekt:

**Diplomarbeit Ödometer**

-  
-

Projektnummer:

704 DIÖD

Datum:

20.01.2016

## ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

PROBENDATEN					
Probennummer			4D_K0	5A	5B
Entnahmestelle			-	-	-
Entnahmetiefe	[m]		-	-	-
WASSERGEHALT					
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	24,7	22,1	-
KONSISTENZ					
Fließgrenze	$w_L$	[%]	-	-	-
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	-	-	-
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	-	-	-
DICHTE					
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,76	-	-
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Porenanteil	$n$	[-]	-	-	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-	-	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-	-	-
KORNVERTEILUNG					
Steine	$C_o$	[%]	-	-	-
Kies	$Gr$	[%]	-	-	-
Sand	$Sa$	[%]	-	-	-
Schluff	$Si$ (Si+Cl)	[%]	-	-	-
Ton	$Cl$ (-)	[%]	-	-	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt					
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-	-	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-	-	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	-	-	-
KOMPRESSIONSVERSUCH			Abb. 15	Abb. 16	Abb. 17
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	12,3	17,7	15,4
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	119 - 252	117 - 249	117 - 249
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	33,9	34,4	21,4
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	119 - 252	117 - 249	117 - 249



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**  
**ERDBAULABORATORIUM**  
 Karlsplatz 13/220-2  
 1040 Wien

Projekt:

**Diplomarbeit Ödometer**

Projektnummer:

704 DIÖD

Datum:

20.01.2016

## ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

PROBENDATEN					
Probennummer			5C	6A	6B
Entnahmestelle			-	-	-
Entnahmetiefe	[m]		-	-	-
WASSERGEHALT					
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	-	-	-
KONSISTENZ					
Fließgrenze	$w_L$	[%]	-	-	-
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	-	-	-
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	-	-	-
DICHTE					
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	-
Porenanteil	$n$	[-]	-	-	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-	-	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-	-	-
KORNVERTEILUNG					
Steine	$C_o$	[%]	-	-	-
Kies	$Gr$	[%]	-	-	-
Sand	$Sa$	[%]	-	-	-
Schluff	$Si$ (Si+Cl)	[%]	-	-	-
Ton	$Cl$ (-)	[%]	-	-	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt					
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-	-	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-	-	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	-	-	-
KOMPRESSIONSVERSUCH			Abb. 18	Abb. 1	Abb. 2
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	9,9	20,9	22,0
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	117 - 249
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	18,6	21,9	38,1
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249	117 - 249	117 - 249



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**  
**ERDBAULABORATORIUM**

Karlsplatz 13/220-2  
1040 Wien

Projekt:

**Diplomarbeit Ödometer**

-  
-

Projektnummer:

704 DIÖD

Datum:

20.01.2016

## ERGEBNISSE DER BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

PROBENDATEN			
Probennummer			6C
Entnahmestelle			-
Entnahmetiefe	[m]		-
WASSERGEHALT			
natürlicher Wassergehalt	$w_n$	[%]	-
KONSISTENZ			
Fließgrenze	$w_L$	[%]	-
Plastizitätsgrenze	$w_P$	[%]	-
Plastizitätszahl	$I_P$	[%]	-
DICHTE			
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-
Feuchtdichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-
Trockendichte	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	-
Porenanteil	$n$	[-]	-
Lockerste Lagerung	$n_{max}$	[-]	-
Dichteste Lagerung	$n_{min}$	[-]	-
KORNVERTEILUNG			
Steine	$C_o$	[%]	-
Kies	$Gr$	[%]	-
Sand	$Sa$	[%]	-
Schluff	$Si$ (Si+Cl)	[%]	-
Ton	$Cl$ (-)	[%]	-
Klammerwerte, falls Tongehalt nicht bestimmt			
Ungleichförmigk.	$C_u$	[-]	-
Krümmungszahl	$C_c$	[-]	-
Grobfaktor	$G$	[cm <sup>2</sup> ]	-
KOMPRESSIONSVERSUCH			
Abb. 3			
Steifemodul	$E_{oed,1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	19,7
Erstbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249
Steifemodul	$E_{oed,2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	48,2
Zweitbelastung	gültig bei $\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	117 - 249