



Universität für Bodenkultur Wien

# **Untersuchung der Scherfestigkeit eines sandigen Schluffes im gesättigten und teilgesättigten Zustand mittels drainierter triaxialer Druckversuche**

Universität für Bodenkultur

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Geotechnik

Im Masterstudiengang Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

## **Diplomarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Diplom Ingenieurs**

Vorgelegt von

**SU Yi**

Matrikelnummer 0749446

**Erstbetreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wu Wei**

**Zweitbetreuer: Dipl.-Ing. Idinger Gregor, Dr. Soranzo Enrico**

**Eingebracht am 19. 01. 2015**

DIPLOMARBEIT NR. 368

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich immer und überall unterstützt haben. Natürlich bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wu Wei, der mir die Möglichkeit gegeben hat diese Arbeit zu verfassen. Mein besonderer Dank gebühren meinen zwei Betreuern: Herrn Dipl.-Ing. Idinger Gregor und Herrn Dr. Soranzo Enrico. Sie haben viel Zeit für Betreuen meiner Diplomarbeit genommen, ohne ihre Hilfe hätte ich das niemals geschafft. Auch gilt mein Dank den Laborleitern Herrn Grogger Martin, der mir bei den Versuchen wertvoller Tipps gegeben hat. Diese Danksagung wäre nicht komplett ohne ein Dankschön an meinen guten Freund Dr. Strnadt Kurt für das Korrekturlesen der Arbeit.

Zu guter Letzt noch ein großes Dankeschön an alle, die mich mit Wort und Tat unterstützt haben.

## Abstract-deutsch

Das Labor des Instituts für Geotechnik der Universität für Bodenkultur besitzt eine computergesteuerte Triaxialanlage der Firma Wille Geotechnik. Mit dieser Anlage wurden verschiedene Scherversuche an einem sandigen Schluff durchgeführt. Insgesamt wurden sechs Prüfserien aus jeweils drei konsolidierten, drainierten Einzelversuchen (D-Versuche) abgearbeitet. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss der Saugspannung auf die Scherfestigkeit des Bodens zu ermitteln. Die Versuche wurden in teilgesättigter und gesättigter Bedingung mit zwei unterschiedlichen Einbaudichten durchgeführt. Dabei wurde zunächst der Modellboden auf einer gewünschten Lagerungsdichte gebracht, und unter gesättigter oder teilgesättigter Bedingung mit unterschiedlicher Konsolidationsspannung gesetzt und abgeschert. Messungen der Spannungen und Volumenänderung des Bodens wurden mit der Software GEOsys aufgezeichnet. Sie wurden mittels MS Excel ausgewertet, um die Scherparameter des Mohr- Coulomb 'schen Modells zu ermitteln. Als Ergebnis wird abschließend die Scherfestigkeit des Bodens anhand Kohäsion und Reibungswinkel präsentiert und interpretiert. Für ansteigende Saugspannungen konnte eine Zunahme der Scherfestigkeit beobachten werden, resultierend aus einem Anstieg der Kohäsion als auch des Reibungswinkels.

## **Abstract-english**

There is a computer-controlled triaxial equipment in laboratory of the institute of geotechnical engineering at the University of Natural Resources and Life Sciences Vienna. Several shear tests were operated on a sandy silt. Six test series were carried out and each of them consisted of three consolidated, drained single test. The target of existing experiment was to investigate the effect of matrix potential on shear strength of the test soil. Those tests were under different saturation (saturated and unsaturated) and two different initial densities (dense and loose) conditions. The soil sample was compressed to a desired bulk density, and then compressed and sheared with different defined confining pressure under saturated and unsaturated conditions. The measurement of pressure and change of soil volume was recorded with the software GEOsys and evaluated with MS Office, in order to determine the shear parameters i.e. cohesion and friction angle. The test results show close correlation between suction and shear strength.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>DAS VERSUCHSWESEN .....</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>DEFINITIONEN DER BEGRIFFE .....</b>	<b>8</b>
	3.1 Scherfestigkeit.....	8
	3.2 Grenzbedingung.....	12
	3.3 Reibung .....	14
	3.4 Kohäsion .....	19
<b>4.</b>	<b>SAUGSPANNUNG UND RETENTIONSKURVE .....</b>	<b>22</b>
<b>5.</b>	<b>MODELLBODEN.....</b>	<b>24</b>
<b>6.</b>	<b>TRIAxIALVERSUCH.....</b>	<b>28</b>
	6.1 Versuchswesentliche Terminologie .....	31
	6.2 Gerätschaft der Triaxialanlage .....	34
	6.3 Versuchsphase-Herstellung der Probe .....	47
	6.4 Versuchsphase-Einbau der Probe ins Triaxialgerät.....	51
	6.5 Vorbereitung der Zelle am Prüfstand .....	55
	6.6 Probleme beim Einbau der Bodenprobe und mögliche Gegenmaßnahmen .	58
	6.7 Durchführung des Triaxialversuchs.....	61
<b>7.</b>	<b>AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE.....</b>	<b>68</b>
<b>8.</b>	<b>INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE.....</b>	<b>85</b>
<b>9.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>87</b>
<b>10.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>
<b>11.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>
<b>12.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>91</b>

# 1. Einleitung

Der Triaxialversuch erlaubt eine genaue Untersuchung des Bodens vor allem hinsichtlich seines Scherverhaltens. Die umfassenden Versuchsergebnisse können für die weiteren Untersuchungen wie der Stabilitätsanalyse verwendet werden. Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Theorie über die Scherfestigkeit von Böden, mit Fokus auf den Einfluss teilgesättigter Böden, einer Beschreibung der Versuchsanlage sowie Versuchsdurchführung, und Interpretation der Messergebnisse. Für die Auswertung der Versuche wurde ein einfaches Modell für die Definition von effektiven Spannungen teilgesättigter Böden angewandt, welches die Parameter Saugspannung und Sättigungsgrad verwendet.

## 2. Das Versuchswesen

In Geotechnik spielen die Versuche eine wichtige Rolle. Man benötigt die Versuchsdaten zur Verifikation von theoretischen Annahmen und für die Bestimmung der Parameter. Da Bodenproben sehr störungsanfällig sind, hängt die Güte der Versuchsdaten stark von der Versuchsvorbereitung und –durchführung ab. Für die Vorbereitung der Probe spielt die handwerkliche Geschicklichkeit eine wichtige Rolle. Die Genauigkeit der Durchführung der Versuche nähert sich asymptotisch einer Grenze, die aber wegen der unvermeidlichen Ungenauigkeiten bei Durchführung nie komplett erreicht wird. Nach einer allgemeinen Beschreibung des Triaxialversuchs werden die Versuchsprozesse und die damit verbundenen Probleme beschrieben. Das Ausarbeiten der Daten soll ermöglichen, das wahre Verhalten des zu untersuchenden Bodens darzulegen. Die Güte der Ausarbeitung kann mit unterschiedlichen Korrelationsmethoden überprüft werden.

Die vorliegende Arbeit ist nicht die erste über die Untersuchung der Böden mittels eines Triaxialgerätes, und sie wird bestimmt nicht die letzte sein. Die Arbeiten der Vorgänger sind gute Vorlagen und Unterlagen, sie werden herangezogen, um das Verfassen der vorliegenden Arbeit zu unterstützen.

Das Wissen über die Scherfestigkeit hilft uns angemessene Aussagen zu treffen, ob der vorliegende Boden für die Anforderungen der unterschiedlichen geotechnischen Konstruktionen geeignet und tauglich sein kann.

# 3. Definitionen der Begriffe

## 3.1 Scherfestigkeit

Festigkeit bezeichnet einen Grenzzustand, bei dessen Erreichung das Versagen des Materials eintritt. Die Scherbeanspruchung repräsentiert die tatsächliche Belastung, sie ist eine variable Zustandsgröße. Die Scherfestigkeit ist ebenfalls keine Bodenkenngroße, denn sie ist an den isotropen Spannungsanteil gekoppelt. Erwähnt wurde die Unterscheidung zwischen dem Scheranspruch und der Scherfestigkeit. Unter dem Motto „actio gleich reactio“ gemäß dem dritten Newton'schen Axiom beharrt der Körper in einem ruhigen Zustand, wenn die einwirkende Kraft kleiner oder ist wie die widerstehende. Die Scherfestigkeit, die sich durch die Verteilung der widerstehenden Kraft auf die Querschnittsfläche ergibt, ist von den internen Eigenschaften des Bodens abhängig. Die Grenze der Scherfestigkeit ist gleich der Grenze der möglichen Scherbeanspruchung, sie stellt den Schnittpunkt der beiden Größen dar.

Zwei Komponenten bestimmen die Scherfestigkeit der Böden:

1. Der Reibungsanteil: Er hängt direkt von der Größe der Normalspannungen an den Kontaktflächen der einzelnen Bodenpartikeln ab. Der Scherwiderstand gegenüber der Verformung erfolgt über kontinuierliche Verschiebung der Bodenpartikel.
2. Der Kohäsionsanteil: Dieser Anteil existiert unabhängig von der Größe der Normalspannungen. Die Kohäsion wird durch die Wirkung des hygroskopischen Wassers hervorgerufen.

Bei näherer Betrachtung lässt es sich feststellen, dass die Größe der Scherfestigkeit vor allem von den Reibungskräften der Bodenpartikeln auf der zu untersuchenden Querschnittsfläche abhängig, nämlich

$$F = \mu N$$

$F$  steht für die Reibungskraft auf der Querschnittsfläche

$\mu$  steht für den Reibungskoeffizienten

$N$  steht für die Normalkraft

Dividiert man die beiden Seiten der Gleichung durch die Schnittfläche  $A$ , erhält man die neue Gleichung:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi$$

$\tau_f$  steht für die Scherfestigkeit

$\sigma$  steht für die vertikale Spannung über die Schnittfläche

$\varphi$  steht für den inneren Reibungswinkel

Aus den oben angeführten Gleichungen kann erkannt werden, dass die Scherfestigkeit größer wird, je größer die vertikale Spannung ist. In diesem Fall ist zu erwarten, dass Boden aus den tieferen Schichten aufgrund der großen vertikalen Spannung hohe Scherfestigkeit besitzt.

Der Anteil der Kohäsion ist von der Reibung unabhängig und wird er als Summand betrachtet.

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$$

Boden ist im Vergleich zu Festgesteinen empfindlich gegenüber der Scherbeanspruchung. Mit Erreichen der Scherfestigkeit kommt es zu Versagen. Dabei kann zwischen einem spröden Versagen und einem plastischen Fließen unterschieden werden. Wenn trotz zunehmender Verformungen die Schubspannungen gleich bleiben, handelt es sich um ein plastisches Fließen.

Innerhalb einer Versuchsreihe werden bestimmte Versuchsbedingungen gleich gehalten, und die unter verschiedenen Seitendrücken  $\sigma_3$  erreichten Spannungszustände zeigen sich in der Mohr'schen Darstellung als Spannungskreise.

**Bestimmung der effektiven Scherfestigkeit**

Innerhalb eines Kontinuums betrachtet, muss die Scherfestigkeit auf Spannungen, nicht auf Kräfte bezogen werden. Ziel der Scherversuche ist die Bestimmung der Scherfestigkeit, daher sollen die Bodenproben möglichst homogene Spannungszustände erzeugen. Es muss zwischen dem gesättigten und teilgesättigten Boden in Bezug auf seine Scherfestigkeit unterschieden werden. Auf den Boden wird sowohl Normalspannung als auch Scherspannung ausgeübt. Die Übertragung der Spannung erfolgt über das Wasser, welches sich in den Poren befindet, oder über die Bodenpartikeln. Die Spannungsübertragung zwischen den Bodenpartikeln geschieht über die Kontaktpunkte der Körner, und dies ist für die Verformung des Bodens verantwortlich, weil die Bodenstruktur nur durch Gleiten und Rollen an den Kontaktpunkten der Körner deformiert werden kann. Der hydrostatische Druck wirkt einheitlich auf die ganzen Körner, mit anderen Worten wirkt diese Spannung auf die gesamte Oberfläche des Querschnitts. Wenn die Porenwasserdrücke von der gesamten Spannung, die auf den Bodenkörper ausgeübt wird, abgezogen werden, bleibt die Kraft übrig, die auf die Kontaktflächen ausgeübt wird. Da das Wasser keine Schubspannung aufnehmen kann, wird diese durch die Körner getragen. Und wenn zwischen den Körnern kein Kontakt besteht, mit anderen Worten wenn sie vollständig vom Wasser umgeben sind, wird die gesamte Spannung unverändert auf die Bodenpartikeln übertragen werden, und der Boden besitzt unter diesem Zustand keine Scherfestigkeit. Manche zähen Fluide wie Öle sind in der Lage, gewisse Schubspannungen aufzunehmen und besitzen also eine gewisse Scherfestigkeit. Sie ist aber im Vergleich zu den Porendrücken vernachlässigbar klein (Verruijt, 2006). Zwischen der totalen Spannung, der effektiven Spannung und dem Porenwasserüberdruck gilt das folgende Gesetz von Terzaghi:

$$\sigma = \sigma' + P$$

Die totale Spannung besteht bei vollgesättigtem Boden aus dem Porenwasserdruck und der effektiven Spannung. Die effektive Scherfestigkeit ist also jene Festigkeit, die alleine von den Bodenfeststoffen stammt. In der Bodenmechanik werden die effektiven Spannungen durch das Zeichen ' gekennzeichnet, diese Akzentsetzung ist eine Konvention. Für nicht wassergesättigte oder konsolidierte Böden ist die totale Spannung gleich der effektiven Spannung, weil der Porenwasserdruck gleich Null ist.

Und wenn die effektive Spannung bis Null reduziert wird, ist die totale Spannung mit dem Porenwasserdruck gleichzusetzen. Daraus folgt noch, dass die Werte des Reibungswinkels und der Kohäsion im diesem Fall gleich sind. Als Feinboden wird der Siebdurchgang kleiner als 2 mm bezeichnet, der Rückstand als Grobboden oder Bodenskelett (Kammerer, 2012). Das heißt, dass der Feinboden von dem Bodenskelett ausgeschlossen wird, und er nach der Definition nichts zu der effektiven Scherfestigkeit beitragen soll. Das ist der Grund dafür, dass andere Phänomene die Scherfestigkeit der feinen oder bindigen Böden ausmachen. Wenn die Lagerungsdichte die Scherfestigkeit der nicht bindigen Böden bestimmt, spielt die in der Vergangenheit ausgeübte Spannung die entscheidende Rolle für die kohäsiven Böden hinsichtlich der Scherfestigkeit. Bei gesättigten Böden kann die effektive Scherfestigkeit leicht ermittelt werden. Denn per Definition ist die effektive Scherfestigkeit jener Widerstand, der alleine von dem Korngerüst geleistet wird, und sie kann ausgedrückt werden, wobei  $u_w$  für Porenwasserdruck steht:

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

Bei den ungesättigten Böden ist es aufgrund des negativen Porenwasserdrucks komplexer. Bei Messung des negativen Porenwasserdrucks spielt die feine Keramikplatte eine wichtige Rolle. Sie wirkt als Isolator zwischen Wasser und Luft, und hindert den Wassereintritt in die Prüfzelle bis zum baulichen Lufteintrittspunkt der Keramikplatte. Der Lufteintrittspunkt liegt je nach Sorte der Platte unterschiedlich. Die Gefahr liegt allerdings im Auftritt der Kavitation.

Das Konzept der effektiven Scherfestigkeit nach Terzaghi kann die ungesättigten Böden nicht angemessen beschreiben. Bishop formulierte die effektive Spannung für ungesättigten Boden wie folgendes:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

$$\tau = c' + \tan\phi'((\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w))$$

Gemäß der Formel definieren zwei unabhängige Summanden die Eigenschaft der effektiven Scherfestigkeit, die Net Spannung und die Saugspannung.  $\chi$  wird als effektiver Spannungsparameter bezeichnet, und oft mit dem Sättigungsgrad

gleichgesetzt. Im Fall der Sättigung ist gleich  $\chi = 1$  und die Gleichung wird mit jener Gleichung nach Terzaghi identisch sein. Es muss erwähnt werden, dass es nicht unumstritten ist,  $\chi$  als mit dem Sättigungsgrad deckungsgleich zu betrachten. Einige Publikationen weisen auf signifikante Unterschiede hin (Nuth, Laloui, 2007). Folgender Ausdruck wird von (Delage, 2002) erwähnt.

$$\chi = \left[ \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0.55}$$

$$(u_a - u_w) < (u_a - u_w)_b$$

$$\text{und } \chi = 1, \text{ wenn } (u_a - u_w) \geq (u_a - u_w)_b$$

Wobei  $(u_a - u_w)_b$  dem Lufteintrittspunkt der Probe entspricht.

Für die vorliegende Arbeit wird jedoch der Sättigungsgrad eingesetzt.

### 3.2 Grenzbedingung

Nach DIN 18137-1 ist die Grenzbedingung jene Gleichung der Spannungskomponenten, durch welche die von einem Bodenkörper aufnehmbaren Spannungen begrenzt werden. Die Grenzbedingung ist also dadurch gekennzeichnet, dass bei deren Überschreitung der Boden zum Versagen kommt. Außerdem ist sie materialspezifisch. Bei einem wassergesättigten bindigen Boden kann die Grenzbedingung sowohl durch die totalen als auch durch die effektiven Spannungen ausgedrückt werden. Die Grenzbedingung kann mit der Mohr-Coulomb Gleichung ausgedrückt werden:  $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ , wobei  $c$  für die Kohäsion steht und  $\tan \varphi$  das Verhältnis zwischen der Normalspannung und der Scherspannung darstellt.

Wenn die Grenzbedingung die Seite des Widerstands repräsentiert, kann die maximale Einwirkung durch den Grenzzustand beschrieben werden. Grenzzustand ist jener Zustand der Spannungen und Dehnungsänderungen des Bodens, in welchem die Spannungen der Grenzbedingung entsprechen. Der Grenzzustand äußert sich durch das Auftreten der Scherfläche, das heißt, entlang der Scherfläche ist die Grenzbedingung der Scherfestigkeit erreicht.

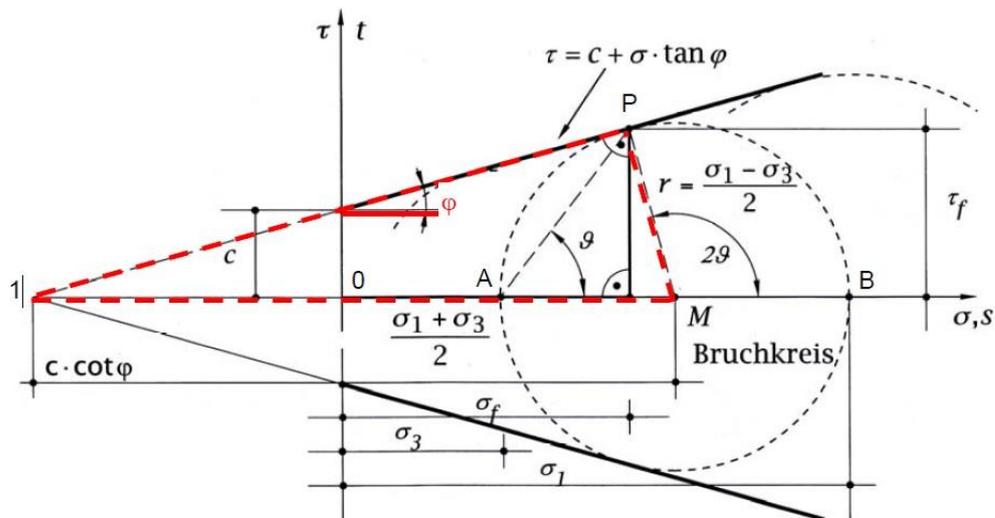


Abbildung 1: Mohr-Coulomb Darstellung der Scherfestigkeit (Henning/Schmidt, 2006 modifiziert)

Die Abbildung 1 ist eine graphische Darstellung der Mohr-Coulomb'schen Theorie der Grenzbedingung. Der Mohrsche Spannungskreis dient zur Darstellung der Spannungsverhältnisse in einem beliebigen Punkt einer Fläche. Die wesentlichen Parameter des Mohr-Coulomb'schen Versagenskriteriums werden einfacherweise abgebildet. Das Versagenskriterium wird als Ausgleichsgeraden dargestellt, die gewöhnlicherweise durch drei Versuche gewonnen werden, die durch die Gleichung  $\tau_f = \sigma \tan \varphi$  repräsentiert werden. Aus der Kreisgeometrie betrachtet ist der Kreisradius mit der Grenzbedingung eines Triaxialversuchs deckungsgleich und kann mit  $\tau_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$  formuliert werden. Die Neigung dieser Geraden gegenüber der Abszisse entspricht dem Reibungswinkel  $\varphi$ . Der Abschnitt der Geraden mit der Ordinate entspricht der Kohäsion C. Die Punkte A und B repräsentieren die Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ , diese weisen per Definition keine Scherspannung auf. Der Bruchkreis stellt den Zustand des Bodens dar, welcher unter Spannung steht. Wenn der Bruchkreis sich vollkommen innerhalb der Grenzgerade befindet, tritt kein Versagen auf. Die Scherfläche ist durch die Punkte A und P definiert und die Neigung entspricht dem Scherwinkel  $\theta$ . Aus der trigonometrischen Beziehung kann folgendes abgeleitet werden:

$$\theta = 45 + \varphi / 2$$

Die Richtung der Versagensfläche ist also nur vom Reibungswinkel  $\varphi$  abhängig, nicht aber von der Kohäsion, während die Scherfestigkeit von Kohäsion und Reibung ausgemacht wird. Mit anderen Worten kommt der Reibungsanteil bei der Richtung der Versagensfläche mehr zur Entfaltung.

Das Versagen tritt ein, wenn der Bruchkreis die Grenzgerade tangiert. Das weist darauf hin, dass das Versagen der Böden zunächst bevorzugt entlang bestimmter Flächen eintritt, weil die Scherfestigkeit anderer Querschnittsflächen bei der vorherrschenden Spannung noch nicht ausgeschöpft ist.

### **3.3 Reibung**

Der Begriff „Reibung“ impliziert eine Interaktion zwischen zumindest zwei Körpern. Reibung kann als Widerstandskraft definiert werden, die an einem Körper angreift und das Gleiten des Körpers relativ zu einem zweiten Körper verhindert oder verlangsamt (Adam, 2013). Es wird zwischen Haft- und Gleitreibung unterschieden. Die Unterscheidung liegt darin, ob Bewegung stattfindet. Findet keine Bewegung zwischen den Körpern statt, so bezeichnet man die Widerstandskraft als Haftreibung. Bewegen sich die Körper relativ zueinander, spricht man von Gleitreibung (Adam, 2013). Die Scherfestigkeit kann nur über Reibung übertragen werden. Die Haft- und Gleitreibung tragen unterschiedliche zur Scherfestigkeit bei. Dichtere und lockerere Böden weisen unterschiedliches Verhalten während des Schervorgangs auf, wie die folgende Grafik zeigt.

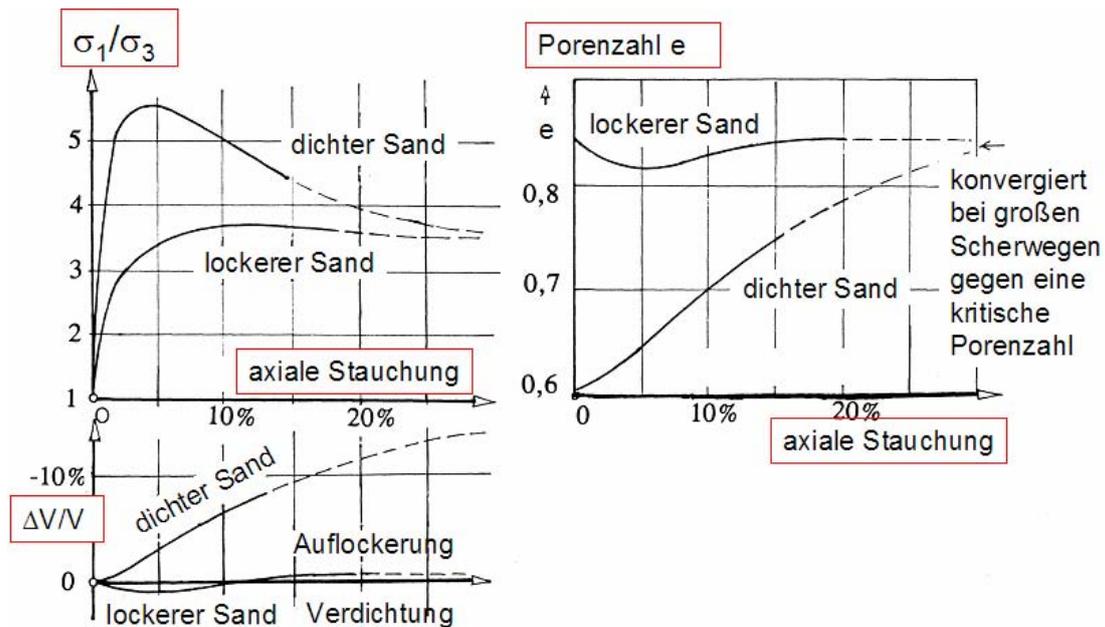


Abbildung 2: Scherverformung bei dichter und lockerer Ausgangsdichte (Taylor, 1948)

Der kritische Zustand in dem vorliegenden Fall umfasst die kritische Spannung, die kritische Lagerungsdichte und die kritische Porenzahl. Die Gemeinsamkeit dieser kritischen Zustände ist dadurch gekennzeichnet, dass nach deren Erreichen die jeweilige Lagerungsdichte, Porenzahl oder Spannung nicht mehr weiter steigt. Ein dichter Sand, der eine größere Lagerungsdichte hat, dehnt sich während des Schervorgangs auf, und erfährt die Dilatanz, während ein lockerer Sand mit einer kleineren Lagerungsdichte als die kritische Lagerungsdichte bei der Scherbeanspruchung verdichtet wird. Es entspricht also der Kontraktion. Die Begriffe „Dilatanz“ oder „Kontraktion“ beziehen also auf die Veränderung des Volumens.

Es kann außerdem behauptet werden, dass die Haftreibung vor allem für den Anteil der Scherfestigkeit verantwortlich ist, der bis zu dem maximalen Wert, also bei den dichten Böden den Peak, ansteigt. Danach fällt die Scherfestigkeit langsam und stetig bis zum Endwert. Dieser Endwert ist eindeutig kleiner als die maximale Scherfestigkeit am Peak, und wird oft als die Restscherfestigkeit oder kritische Scherfestigkeit bezeichnet. Das Phänomen ist nicht nur bei den dichten Böden zu beobachten, ähnlich verlaufen die Spannungs- und Verformungsverhältnisse bei den bindigen Böden. Anders als bei den lockeren Böden steigt die Scherfestigkeit eines nicht bindigen Bodens mit Zunahme der Spannung an und nähert sich tangential einem Endwert, der

sogenannten kritischen Scherfestigkeit. Sie stellt sich ebenfalls als die maximal erreichbare Scherfestigkeit dar. Wenn dichte und lockere Böden den gleichen Reibungswiderstand besitzen, haben die dichten Böden höhere Gleitsicherheit. Denn es muss bei den dichten Böden eine höhere Scherfestigkeit überwunden werden.

$T$  repräsentiert die für den Zustand des Gleitens erforderliche Tangentialkraft. Sie steigt proportional mit  $N$ , die normal zur Kontaktfläche wirkt. Es wurde bereits erwähnt, dass es eine enge Beziehung zwischen der Normalkraft  $N$  und der Querkraft  $T$  besteht. Durch eine geometrische Darstellung kann diese Beziehung veranschaulicht werden:  $\frac{N}{T} = \tan \varphi$ . Das Verhältnis zwischen  $T$  und  $N$  ist der Proportionalitätsfaktor, er wird auch als  $\mu$  bezeichnet, das ist der Winkel zwischen der Resultierenden und der Normalen. Der Unterschied zwischen der Haft- und der Gleitreibung erfolgt durch den Vergleich mit dem Grenzwert  $\tau_f$ . Das Bewegen der Körper wird solange nicht geschehen, so lange  $T$  kleiner als  $\tau_f$  ist.

$$\text{Haften: } T < N \tan \sigma$$

$$\text{Gleiten: } T = N \tan \sigma, \text{ wobei } N \tan \sigma = \tau_f$$

Es gibt einige Eigenschaften oder Bodenkenngrößen, die die Intensität der Reibungskraft beeinflussen: die Porenzahl, die Kornverteilung, die Geometrie der Körner im Boden und der materielle Bestandteil des Bodens.

Die Größenordnung für den Porenanteil  $n$  oder für die Porenzahl  $e$  kann aus theoretischen Überlegungen abgeleitet werden. Idealisiert man die Form der Bodenpartikel zu lauter Kugeln gleicher Größe mit dem Durchmesser  $d$ , beträgt das Partikelvolumen  $V_s = d^3 \varphi / 6$  und der Porenanteil  $n = V_p / V = 0,476$ . Bei der vermutlich dichtesten Packung, der Tetraederpackung, ist  $n = 0,26$ . Obwohl natürliche Böden aus Teilchen unterschiedlichster Größe und Form mit unregelmäßiger Anordnung und Aggregation bestehen, liegt ihr Porenanteil häufig innerhalb des Bereichs  $0,26 < n < 0,46$  (Kammerer, 2012). Die Porenzahl sagt über den Zustand des Bodens hinsichtlich der Lagerungsdichte aus. Bei nichtbindigen Böden ist die Lagerungsdichte die entscheidende Bestimmungsgröße für die Scherfestigkeit, die sich

allein aus der inneren Reibung ergibt. (Zentrum-Geotechnik, 2014) schlägt die Gleichung vor:

$$E \tan \varphi' = \text{const}$$

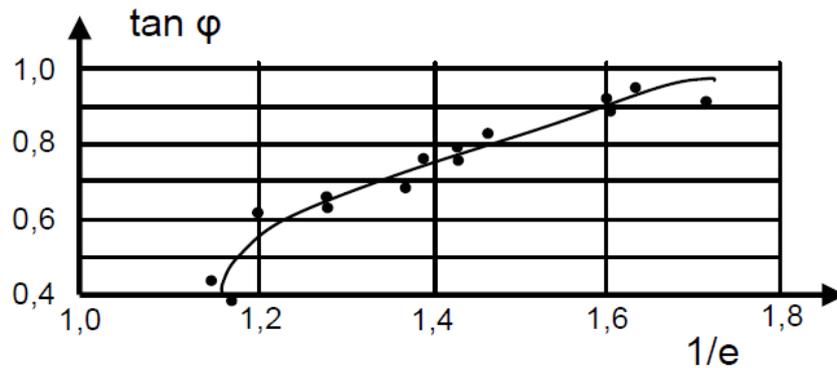


Abbildung 3: Einfluss der Porenzahl auf den Reibungswinkel (Zentrum-Geotechnik, 2014)

Der Beitrag des Korndurchmessers zum Scherwiderstand ist ähnlich wie der der Porenzahl. Ein weitgestufter Boden besitzt unterschiedliche Fraktionen, in ihm treten Partikel mit unterschiedlichen Durchmessern auf. Die Bodenpartikeln mit kleinerem Durchmesser können in die Hohlräume zwischen den größeren Partikeln hinein rutschen und bilden eine kompaktere Masse. Gemäß dem Bild haben die Bodenkörner mit großem Durchmesser einen vergleichsweise größeren Rollreibungsbeiwert.

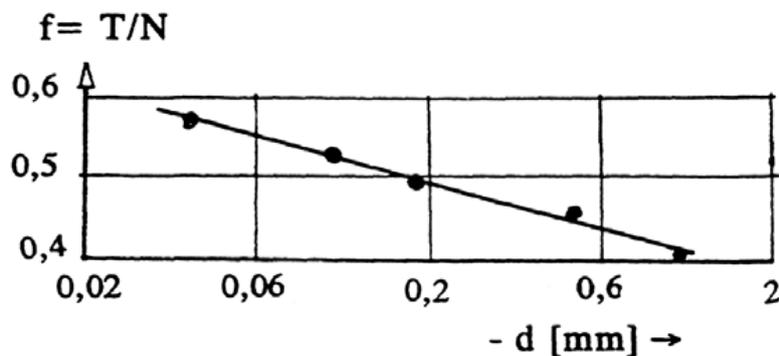


Abbildung 4: Durchmesserabhängigkeit des Rollreibungsbeiwerts bei Quarzsand (nach Rome, 1962)

Da die Scherfestigkeit nur über Reibung übertragen werden kann, wenn eine Belastung in der Kornstruktur wirkt, spielt die Form oder Geometrie der Partikel des Bodens eine Rolle beim Scheren. Die runden Körner weisen einen geringeren Reibungswiderstand auf als die kantigen Körner. Ein gebrochener Sand bei gleicher Porenzahl hat eine größere Scherfestigkeit als ein Natursand. Es gibt jedoch Meinungen, die dafür eintreten, dass der Scherwiderstand nicht von der Geometrie der reibenden Körper abhängt (Zentrum-Geotechnik, 2014). Ursache dafür ist, dass der Kontakt fester Körper nie flächig ist, sondern in einzelnen Punkten erfolgt.

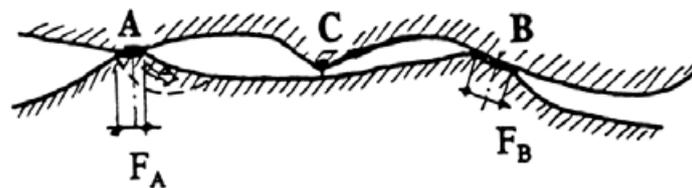


Abbildung 5: Detail eines Kontaktbereiches zwischen zwei Körpern (Lambe, Whitman, 1969)

Denn könnte man sie so glätten und reinigen, dass sie ideal eben und frei von Fremdstoffen „Fläche auf Fläche“ gelegt werden könnten, würden diese Grenzflächen nach dem Prinzip der kleinsten inneren Oberfläche verschwinden müssen, es käme zur Kaltverschweißung. Da die Erhebungen des eines Körpers in der Regel nicht auf die des anderen treffen, sind beide miteinander „verhakt“ und der Grad der Verhakung wächst mit der Normalkraft, weil bei einem Lastzuwachs die jeweils höchstbelasteten Punkte wegbrechen. Das bedeutet wiederum, dass die Gesteinsfestigkeit für die Trockenreibung maßgebend ist. Boden mit mehr Quarzanteil weist eine relativ hohe Gesteinsfestigkeit auf ( $110 \cdot 10^4 \text{ MN/m}^2$  für Quarz nach Brace, 1963) und hat eben einen großen Scherwiderstand. Die stochastische Verteilung der Rauigkeitserhebungen bedingt den für die Trockenreibung kennzeichnenden Unterschied zwischen Haftreibung und Gleitreibung. Sobald die Kontaktpunkte versagen, beginnt eine instationäre Versetzungsbewegung bis zum Erreichen des nächstmöglichen Gleichgewichtszustandes (Zentrum-Geotechnik, 2014).

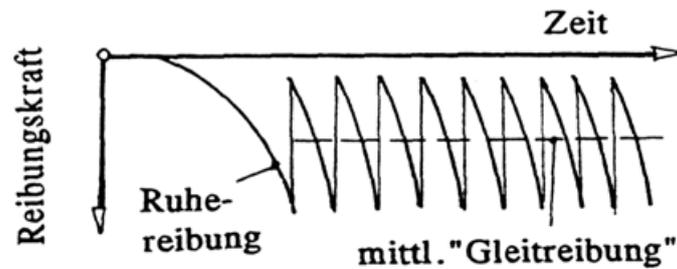


Abbildung 6: stochastische Betrachtung der Haftreibung und Gleitreibung (Lambe, Whitman, 1969)

Der Reibungsanteil ist für die geotechnische Untersuchung von großer Bedeutung, denn es wird angenommen, dass der Scherwiderstand des Bodens hauptsächlich durch die Reibung zwischen den Bodenpartikeln übernommen wird. Das bedeutet also, dass die Reibung den großen Anteil der Scherfestigkeit ausmacht. Es kann daher zusammengefasst werden, dass die Scherfestigkeit von den folgenden Komponenten abhängig ist (Zentrum-Geotechnik, 2014):

- der Korngrößenverteilung
- der Lagerungsdichte
- dem Spannungszustand und seiner Veränderung.

### 3.4 Kohäsion

Die Kohäsion ist ein Summand in der Grenzbedingung, sie trägt zur Scherfestigkeit bei. Die Kohäsion wird in der Physik definiert als Bindekräfte zwischen den Atomen oder zwischen den Molekülen innerhalb eines Stoffes. Die Kohäsion des Bodens, oder anders bezeichnet: der Binnendruck des Bodens, ist jener Teil der Scherfestigkeit, der vom Boden ohne Wirkung einer äußeren Normalspannung gerade noch ertragen werden kann. Die Kohäsion im Boden ist eine Folge mehrerer physikalischer Phänomene, sie beruht auf folgenden bekannten Ursachen (Adam, 2013):

1. Elektrostatische Anziehungskräfte
2. Oberflächenspannungen des Hüll- und Porenwassers
3. Verkittungen

#### 4. Verzahnungen

5. Die Oberfläche der Tonminerale ist elektrostatisch geladen. Diese elektrostatischen Anziehungskräfte wirken zwischen den feinkörnigen Bodenkörnern und stellen einen wichtigen Bestandteil der Kohäsionskraft bindiger Böden dar. Die Größe dieser zusammenhaltenden Kraft ist unter anderem vom Anteil und der Art der Tonminerale am Feinkorn abhängig. Das heißt, die Böden mit wenig bis keinem Tonanteil verlieren die Eigenschaft der elektrostatischen Anziehungskräfte.

Unterschiedliches Material weist unterschiedliches Verhalten der Kohäsion auf. Es ist wichtig, zwischen Kohäsion der Böden und der Kohäsionskraft der Flüssigkeit zu unterscheiden. Ersteres ist eher ein Summenbegriff einer physikalischen Eigenschaft, darunter fallen unterschiedliche Faktoren, die für diese Eigenschaft verantwortlich sind. Der zweite Begriff beruht drauf, dass sich die Flüssigkeitsmoleküle gegenseitig anziehen. Im Innern einer ruhenden, homogenen Flüssigkeit wirken diese Kräfte nach allen Seiten, halten sich gegenseitig das Gleichgewicht und heben sich somit auf. Die Flüssigkeitsmoleküle an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas werden von den Molekülen in der Flüssigkeit mehr angezogen als von den Gasmolekülen. Will ein Flüssigkeitsteichen aus dem Inneren der Flüssigkeit an die Oberfläche gelangen, so muss der Kohäsionsdruck überwunden werden. Mit dieser Erkenntnis lässt sich leicht erklären, warum das Wasser, das von einem Gas umgebend ist, sich stets dazu tendiert, seine Oberfläche zu minimieren. Die an der Grenzfläche wirkenden, nach innen gerichteten Kohäsionskräfte werden als Oberflächenspannung bezeichnet. Verantwortlich für die Oberflächenspannung sind also die nach verschiedenen Richtungen unterschiedlich starken intermolekularen Anziehungskräfte. Die Oberflächenspannung existiert also vor allen an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas. Als Porenwinkelwasser wird das Wasser im Bereich der Kontaktflächen von Körnern feuchter nichtbindiger Böden bezeichnet.

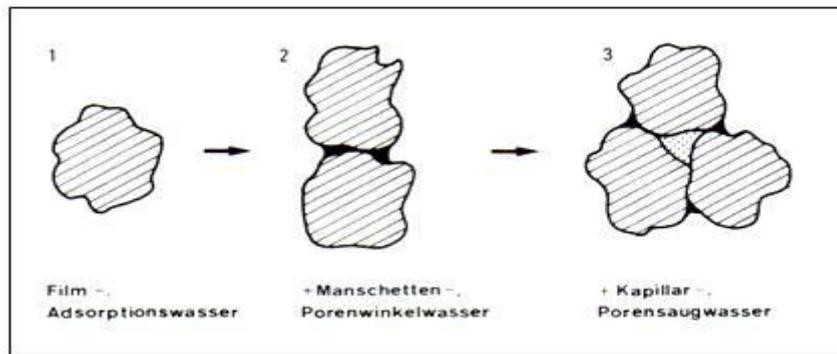


Abbildung 7: Wasserbindung an Bodenkörner (Kuntze, Roeschmann, Schwerdtfeger, 1994)

Durch die Kapillarkräfte des Porenwinkelwassers werden die Bodenkörner aneinander gezogen. Dies führt zu einem „Aneinanderhaften“ der Körner, das als „Kapillarkohäsion“ oder auch scheinbare Kohäsion bezeichnet wird und sich insbesondere bei feinkörnigeren nichtbindigen Böden auswirkt, weil je größer die Einzelkörner und Poren werden, desto kleiner werden die Effekt der scheinbaren Kohäsion. Bei den vollgesättigten und komplett trockenen Böden verliert sie ihre Wirkung. Die Größe der Oberflächenspannung ist von der Art der Flüssigkeit abhängig und empfindlich gegenüber der Temperaturänderungen.

Das kapillar gebundene Wasser und das Adsorptionswasser haben im Prinzip das gleiche Charakteristikum. Wird der Wassergehalt eines nichtbindigen Bodens, zu dem die maximale Wirkung der Kapillarkohäsion gehört, verändert, reduziert sich die Kohäsion mit zunehmender Veränderung immer weiter. So verringern sich die Kapillarkräfte mit fortschreitender Austrocknung des Bodens bis hin zu ihrem endgültigen Wegfall bei vollständig trockenem Boden. Analog dazu reduziert sich die Kapillarkohäsion bei Wasserzugabe, da dadurch die Bodenprobe mit Wasser aufgefüllt wird, endgültig verschwunden ist sie, wenn alle Bodenporen mit Wasser gefüllt sind (Möller, 2012). Dieses Phänomen lässt sich anhand von folgendem Beispiel demonstrieren: Bestimmte Böden weisen natürlichen Binnendruck auf, zum Beispiel Schluff oder Ton, weil diese Böden eine gewisse Menge an Wasser enthalten. Nicht bindige Böden wie Sand haben ursprünglich keine Kohäsion. Unter einem feuchten Zustand weist der sandige Boden allerdings eine bestimmte Größe von Kohäsion auf. Dieses Phänomen lässt sich besten mit einer befeuchteten Sandturm veranschaulichen.

Bei Trockenheit und Vollsättigung verschwindet die Wirkung der Kohäsion. Bei den bindigen Böden ist es allerdings schwer, von einem komplett kohäsionslosen Boden zu sprechen, denn es ist kaum möglich, einen vollständig trockenen bindigen Boden zu finden, dessen Poren frei von jeglichem Wasser sind, ebenso wie einen Boden zu finden, dessen Poren vollkommen frei von Luft sind.

Es gibt Beobachtungen, wonach die chemischen Eigenschaften des Porenfluids die Kohäsion deutlich beeinflussen. Im Zusammenhang mit feinkörnigen Bindemitteln und ihren großen Oberflächen wie Zement können auch stabile Verkittungen entstehen und die hohe Kohäsion bedingen, zum Beispiel: Beton (Zentrum-Geotechnik, 2014).

Das Phänomen der Kohäsion ist aber eine Größe, die oft empirisch bestimmt wird. Diesem Wert wird im Felsbau keine übermäßige Aufmerksamkeit bei praktischen Zwecken geschenkt werden, da ihre Größe im Vergleich zur Komponente der Reibung vernachlässigbar klein ist. Die Kohäsion kann vergleichsweise eine bedeutendere Rolle für Boden spielen, aber da sie unter anderem abhängig von vorhandenen Wassergehalt variieren kann, soll sie vielmehr als zusätzlicher Sicherheitsfaktor betrachtet werden.

## **4. Saugspannung und Retentionskurve**

Zuerst soll darauf aufmerksam gemacht werden, dass der Terminus „Saugspannung“ nicht unumstritten ist. Der genauere Begriff ist die negative Wasserspannung. Das Matrixpotenzial, das sich in englischer Sprache durchgesetzt hat, umfasst sämtliche Kräfte, die auf der Bodenmatrix und ihrer Wechselwirkung auf das Bodenwasser beruhen. Matrixpotential ist ein Teilpotential des Wasserpotentials und variiert zwischen der Adsorptionsspannung von 600MPa an den inneren Oberflächen und 0 bei vollständiger Sättigung (Kammerer, 2012). Das Matrixpotential kann mittels Tensiometer, Gipsblock oder Drucktopf bestimmt werden. Je kleiner das Matrixpotential ist, desto stärker wird das Wasser im Boden gebunden, daher trägt es ein negatives Vorzeichen.

Dieser Begriff ist dann in seiner Bedeutung der Saugspannung insofern ähnlich, wenn das Wasser frei von Ionen ist. Um Einheitlichkeit willen, wird der Begriff „Saugspannung“ in dieser Arbeit weiter beibehalten und stellt die Differenz zwischen dem Porenluft- und dem Porenwasserdruck dar.

Die Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem Energiezustand des Wassers als Folge der Einwirkung des Bodens bzw. der mit ihm in ursächlichem Zusammenhang stehenden Kräfte (insbesondere Kapillar- und Adsorptionskräfte) (Kammerer, 2012). Diese Beziehung kann als eine Retentionskurve zusammengefasst werden. Die Retentionskurve wird auch als Rückhaltekurve, SW-Linie, Bodenwassercharakteristik oder pF-Kurve bezeichnet. Im Labor kann die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung durch das Kapillarmeter bestimmt werden. Die bekanntesten Modelle der Retentionskurve stammen von Brooks und Corey und von Van-Genuchten. Das Modell von Brooks und Corey hat die Ausformung eines Knickes, der den Lufteintrittspunkt repräsentiert. Im Gegensatz dazu kennt das Modell von Van-Genuchten keinen eigenen Bereich der Vollsättigung und die Van-Genuchten-Kurve (Abbildung 8) besitzt keine ausgeprägte Unstetigkeit.

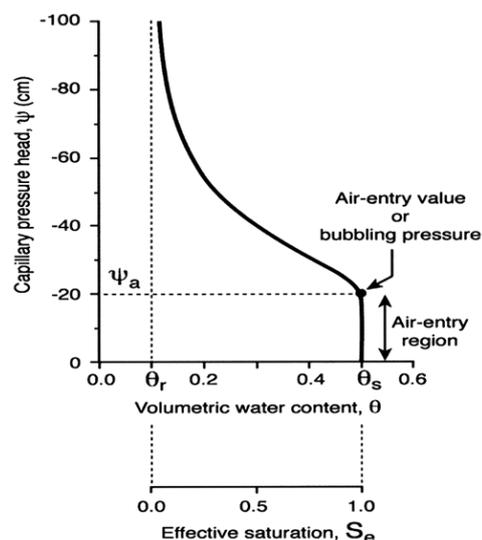


Abbildung 8: Van-Genuchten Kurve

## 5. Modellboden

Aus bodenkundlicher Sicht ist Boden jener Teil der belebten obersten Erdkruste, der nach unten durch festes oder lockeres Gestein und nach oben durch die Vegetationsdecke bzw. die Atmosphäre begrenzt ist (Scheffer und Schachtschabel, 1984). Anders als kompakte Materialien wie Fels besteht der Boden aus drei Phasensystemen. Unter Phase versteht man „*Materie mit homogener chemischer Zusammensetzung und räumlich konstantem physikalischem Zustand*“ (Atkins, Paula, 2006). Der Boden besteht aus Gas, Wasser, Organismen, Feststoff und eventuell weiteren Flüssigkeiten. Daher ist der Boden aus physikalischer Sicht ein poröses Medium, dessen Inhaltsstoffe für die Untersuchung von Prozessen als Mehrphasensystem aufgefasst werden (Kammerer, 2012).

Die Klassifikation und Benennung von Böden erfolgt nach sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten. Unter anderem lassen sich die Böden je nach Perspektive unter folgenden Aspekten einteilen:

1. nach der Geometrie der Böden: Die einfachste Teilung der Bodenart erfolgt durch die Korngröße. Die Bodenklassifizierung ist nicht einheitlich, verschiedene Institutionen haben unterschiedliche Grenzen zwischen den Bodenarten festgelegt; zum Beispiel zwischen den US-amerikanischen Institutionen und europäischen. Die Abweichung der Grenzen zwischen den Institutionen ist aber relativ gering. Es kann grob zwischen den bindigen und nicht bindigen Böden unterschieden werden, das Kriterium der Teilung ist die Korngröße um 0,02 mm als Grenze.
2. nach Anteil der organischen Substanzen: Organische Substanzen sind Überreste pflanzlichen oder tierischen Lebens, die im Boden verblieben sind und im Laufe der Zeit physikalischen und chemischen Umwandlungsprozessen unterworfen wurden. Humus oder Torf sind beispielsweise mit organischen Substanzen angereicherte Böden.

Die Einteilung von Böden kann nach beliebigen Eigenschaften erfolgen, doch nicht all diese Einteilungen sind sinnvoll. Die Einteilung nach bestimmter Eigenschaft soll etwas über das Wesen der Böden aussagen, um die Anwendung dieser Böden in bestimmter Hinsicht zu ermöglichen. Je nach Perspektiven weist die Beschreibung der Böden unterschiedliche Schwerpunkte auf. Boden für bauliche Zwecke unterliegt ganz anderen Anforderungen als der für landwirtschaftliche Zwecke. Für bauliche Zwecke ist ein mächtiger Boden mit wenig Poren und Wasser erwünscht, während diese Elemente unentbehrlich für Böden mit landwirtschaftlicher Nutzung sind. Unter diesem Umstand kann behauptet werden, dass der Begriff „gute Böden“ relativ zu ihrem Nutzen zu verstehen sind.

Der Boden, der in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, ist ein Lössboden, der im Rahmen einer Dissertationsarbeit in Wimpassing, Burgenland, entnommen wird. Lössboden ist dadurch gekennzeichnet, dass er vom Wind angeweht ist und, zumeist hellbraunes Sediment mit hohem Anteil der Teilchengrößen von 0,01 bis 0,05 mm aufweist (Möller, 2012). Um die Eigenschaft dieser Bodenart näher zu erläutern, werden zahlreiche Untersuchungen unternommen. Die folgende Darstellung der Untersuchungen ergibt sich in Anlehnung an die Dissertationsarbeit von DI Enrico Soranzo.

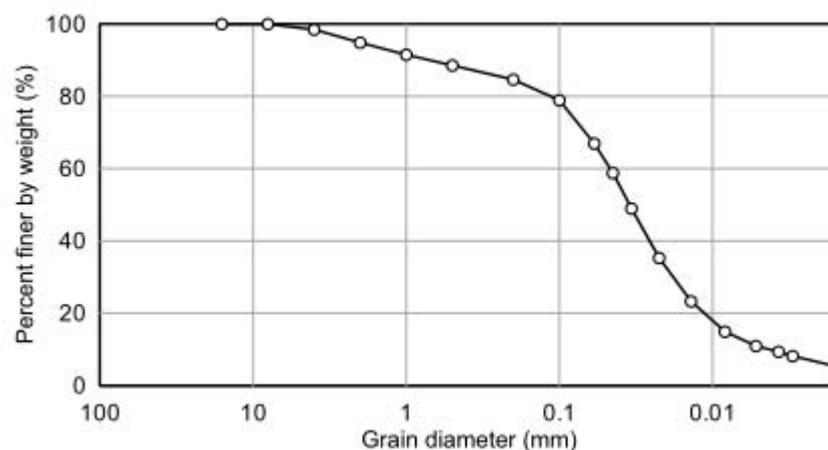


Abbildung 9: Kornverteilungskurve (Soranzo, 2014)

Boden	Gewichtsanteil %
Kies	3.6
Sand	24.7
Schluff	64.4
Ton	7.4

Tabelle 1: Kornfraktion (Soranzo, 2014)

Die Hauptfraktion der zu untersuchende Bodenart ist Schluff, welcher 64,4 Gewichtsprozent ausmacht. Die nächst größere Fraktion ist Sand mit 24,7 Prozent. Die Hauptanteile können als sandiger Schluff bezeichnet werden. Es handelt sich also um einen feinkörnigen Boden, da der Massenanteil des Feinkorns über 40 Gewichtsprozent ausmacht.

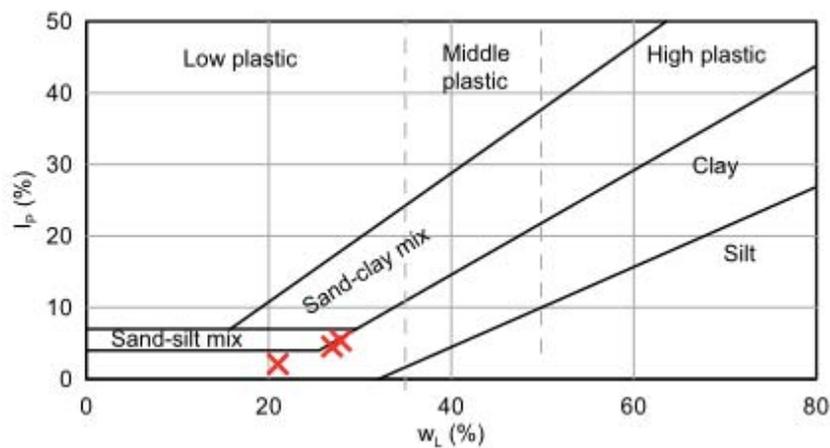


Abbildung 10: Casagrande Diagramm (Soranzo, 2014)

Mit Hilfe des Atterbergschem Versuchs kann der Boden bezüglich des Wassergehalts bestimmt werden. Aus der Abbildung kann herausgelesen werden, dass der Boden zur Gruppe des niedrig plastischen Sand-Schluff-Gemischs gehört.

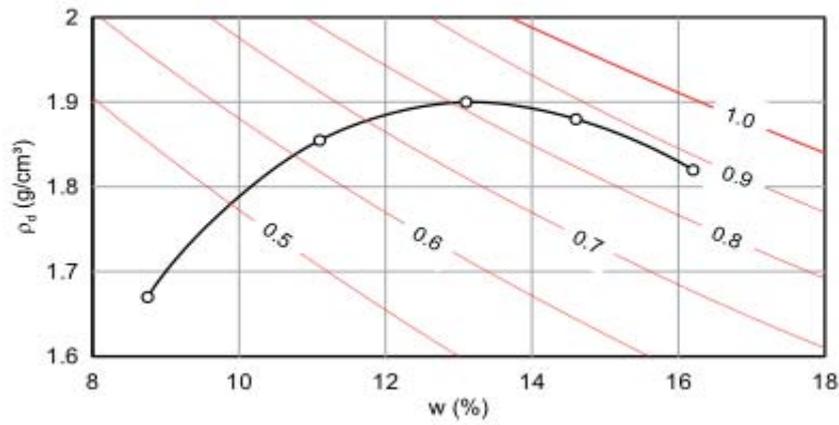


Abbildung 11: Proctor Test (Soranzo, 2014)

Bei einem Wassergehalt von 13,1 % wird die maximale Proctordichte von 1.898 g/cm<sup>3</sup> erwartet.

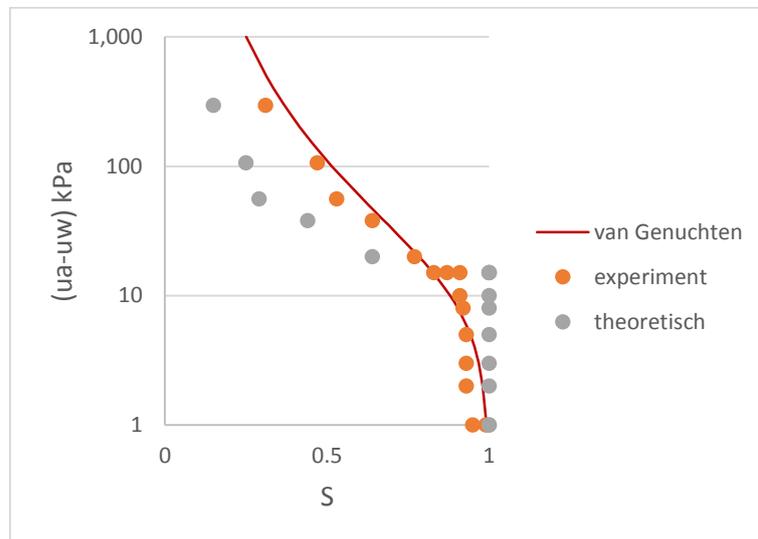


Abbildung 12: Retentionkurse für Bodenprobe mit Trockendichte 1.66 g/cm<sup>3</sup>

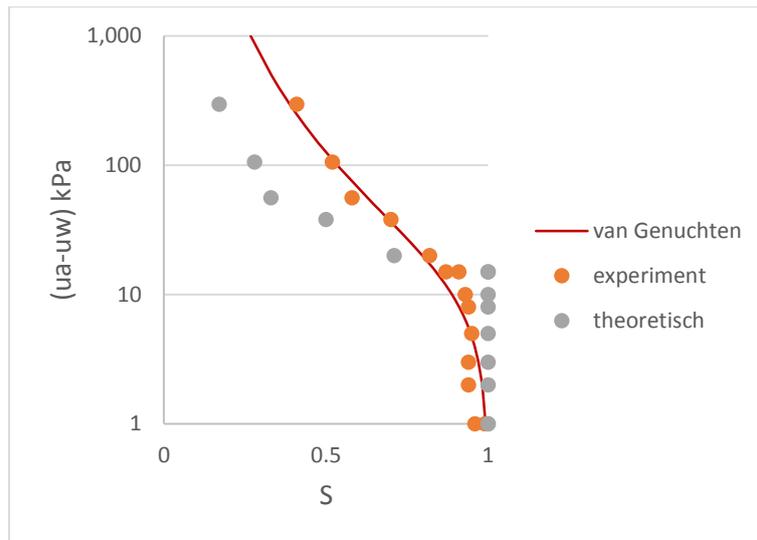


Abbildung 13: Retentionkurse für Bodenprobe mit Trockendichte  $1.72 \text{ g/cm}^3$

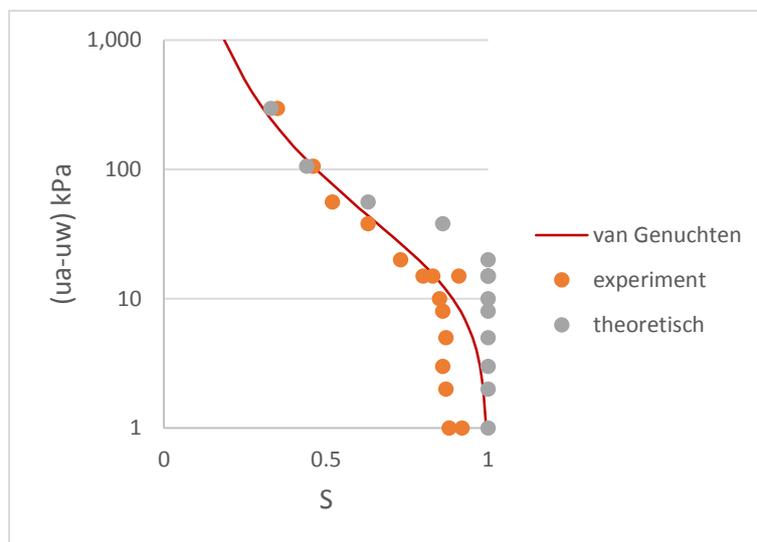


Abbildung 14: Retentionkurse für Bodenprobe mit Trockendichte  $1.8 \text{ g/cm}^3$

Es werden drei Retentionskurven für Boden mit unterschiedlicher Trockendichte dargestellt.

## 6. Triaxialversuch

Der Triaxialversuch wurde in die Bodenmechanik 1928 von Ehrenberg eingeführt. Er heißt zu Unrecht „triaxial“, da bei ihm die Belastung axialsymmetrisch ist: Mit  $\sigma_2 = \sigma_3$

und  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  gibt es bei ihm eigentlich nur zwei unabhängige Spannungsvariablen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  (Kolymbas, 2007). In einem „echten“ Triaxialversuch wird der Prüfkörper kubisch geformt und Spannung in drei orthogonale Richtungen wird auf die Probe appliziert. Ein „echter“ Triaxialversuch weist größere Komplexität auf. Im Gegensatz zum Rahmenscherversuch tritt die Bruchfläche eines Triaxialversuchs nicht entlang einer definierten Zone auf, sondern sie kann sich frei entwickeln. Die eindeutig Schwächen eines Rahmenscherversuchs sind zum Beispiel: Die Bruchfläche ist nicht notwendig die Fläche mit der geringsten Scherfestigkeit. Weiteres ist die Verteilung der Spannung auf der Schnittfläche nicht gleichmäßig und die Schnittfläche wird immer kleiner. Außerdem kann der Drain von Wasser schwer kontrolliert werden. Diese Schwächen werden im Großen und Ganzen vom Triaxialversuch abgeglichen. Im Vergleich zu Feldversuchen weist der Triaxialversuch eindeutig die Eigenschaft auf, dass er viel genauere Untersuchungsergebnisse liefert.

Die Genauigkeit der Messung beruht unter anderem darauf, dass das Volumen der Bodenprobe konstant gehalten wird. Dies kann dadurch realisiert werden, dass die isotropische Spannung  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  während des Tests konstant bleibt (Verruijt, 2006). Besser ist es jedoch, wenn die Änderung des Volumens ganz genau und exakt gemessen und aufgenommen wird, bis sie annähernd null wird.

In einem Triaxialversuch wird die Bodenprobe gewöhnlich zylindrisch umgeformt, und in einer Glas oder plastischen Zelle platziert. Die Probe wird mit einer Membran überzogen und mit O-Ringen gespannt. Die Zelle wird mit Wasser gefüllt, welches entlüftet ist. Da die Bodenprobe vollständig vom Wasser umgeben ist, erfährt die Oberfläche der Bodenprobe die gleiche Größe an Druck. Das bedeutet: der Zelldruck  $\sigma_c$  ist anfangs gleich  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$

Der ganze Triaxialversuch wird oft in zwei Phasen geteilt. Die Phase vor dem Beginn des Scherens und die nach dem Beginn des Scherens. Vor allem in der zweiten Phase des Versuchs kommt zusätzlich zu den lateralen Spannungen des Zelldrucks Spannung durch vertikale Last, versuchstechnisch verwirklicht durch das Hoch- oder Runterfahren des Stempels mit einer konstanten Rate, worauf sich die Prüfzelle befindet. Das bedeutet, dass die vertikale Verformungsrate gleichmäßig gehalten wird

und die Spannung, die auf die Bodenprobe ausgeübt wird, stetig ansteigt. Die Anstiegsrate der vertikalen Spannung wird klein gehalten und gemessen und elektronisch aufgenommen. Die vertikale Verformung am oberen Ende steigt graduell, und aufgrund der konstanten Rate der Vertikallasten ist sie eine Funktion der Zeit. Der Anstieg der vertikalen Last verursacht aufgrund der gleichbleibenden horizontalen Last eine größere Spannungsdifferenz. Die Spannung erreicht nach einer gewissen Zeit das Maximum, dann fällt sie meistens zurück. Der Peak repräsentiert nicht das Versagen, sondern vielmehr, dass der Boden mit dem Versagen anfängt. Das Versagen der Prüfprobe ist sichtbar zu beobachten, wenn die Deformation beispielsweise 5 Prozent erreicht. Weiteres treten an der Prüfprobe klare Risse auf, die Länge der Bodenprobe reduziert sich und ihre Querschnittgröße wird größer. Die tatsächlichen Bruchflächen sind bei lockeren Proben wahrscheinlich nicht auf der Probeoberfläche zu sehen. Vielwahrscheinlicher zeigen die lockeren Bodenproben eine Ausbauchung, während bei dichten Proben eher ein Bruch durch eine Scherfuge manifest wird.

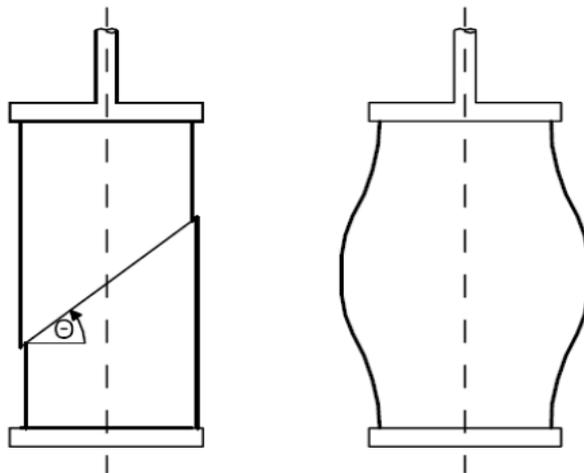


Abbildung 15: Bruchformen dichter und lockerer Proben im triaxialen Kompressionsversuch (Kolymbas, 2007)

Die Zellspannung  $\sigma_c$  ist also den Spannungen in den lateralen Richtungen gleich.

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$$

Die vertikale Spannung ist

$$\sigma_z = \sigma_c + F/A$$

F ist die vertikale Kraft, die auf die Querschnittfläche A der Bodenprobe ausgeübt wird. Falls es sich um sandigen und trockenen Boden handelt, welcher keinen Porendruck aufweist, kann die vertikale Spannung wie folgt formuliert werden.

$$\sigma_1 = \sigma_c + F/A$$

$$\sigma_c = \sigma_3$$

Ziel bodenmechanischer Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit ist, in Bodenproben möglichst homogene Spannungszustände zu erzeugen. Diese homogenen Spannungszustände setzen die Homogenität des Bodens voraus, was Aufgabe der Probeherstellung ist.

## 6.1 Versuchswesentliche Terminologie

### *Bodenprobe*

Es wird zwischen den gestörten und ungestörten Proben unterschieden. Die ungestörten Bodenproben haben hohe Anforderungen an Bewahrungstechnik, denn sie sollen die tatsächlichen Feldbedingungen wie Spannungsverhältnisse, Wassergehalt, Temperatur und so weiter repräsentieren. Die gestörte Probe ist dadurch charakterisiert, dass sie weder in Struktur noch im Wassergehalt mit denen im natürlichen Zustand übereinstimmt. Für die Triaxialversuche werden sowohl ungestörte als auch gestörte Proben herangezogen. Für die Versuche vorliegender Arbeit wird der im Feld entnommene Boden im Labor neu bearbeitet und geformt, um einen versuchstauglichen Zustand zu erreichen.

### *Konsolidation und Drainieren*

Die Verringerung der Porenzahl und die gleichzeitige Umlagerung der Belastung vom Porenüberdruck auf Korngerüst werden als Konsolidation bezeichnet. Konsolidation ist ein wichtiger Prozess für die bindigen Böden. In Zug der Konsolidation senkt sich die Größe der Konsolidation und der Reibungsanteil, der durch den Boden getragen wird, steigt langsam an. Bei den nichtbindigen Böden fließt das Wasser aufgrund der höheren Durchlässigkeit schnell aus den Poren heraus und der Porenwasserdruck kann somit schnell ausgeglichen werden. Die beiden eingeführten Begriffe beziehen sich auf unterschiedliche Versuchsphasen des Triaxialversuchs. Wenn die Entwässerung der Probe während der Konsolidationsphase erlaubt ist, wird diese Versuchsanordnung als „C-Test“ bezeichnet. Ein drainierter Versuch bedeutet nichts anderes, als dass die Entwässerung in der Scherphase stattfindet. Die Bedeutung der Negation der Begriffe (UU-Test) erklärt sich von selbst. Aus der Kombination ergeben sich drei mögliche Arten von Triaxialversuch: „CD-Test“, „CU-Test“ und „UU-Test“. Rein theoretisch, durch Kombinatorik, könnte auch eine 4. Möglichkeit bestehen, jedoch existiert in der Praxis keinen „UD-Test“. Dies weist darauf hin, dass es keinen Sinn macht, den Prüfkörper bei Scheren zu drainieren, ohne ihn davor schon konsolidiert haben. Die Versuche aus der vorliegenden Arbeit sind ausschließlich „CU-Tests“. Die Stärke eines „CU-Tests“ liegt darin, dass die Änderung der Totalspannung gleich der Änderung der effektiven Spannung ist.

### *Axis-Translation-Technique*

Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Porenwasserdruck im ungesättigten Boden zu untersuchen. Am bekanntesten sind die „Axis Translation Technique“ und die „Osmotic Technique“ (Koliji, 2008). Die erste wird in der vorliegenden Arbeit angewendet. Der Porenwasserdruck wird hier ständig über einem positiven Wert gehalten und der Porenluftdruck wird so weit ansteigen, bis die gewünschte Saugspannung  $u_a - u_w$  erreicht ist. Unter diesen Umständen existiert keine Gefahr der Kavitation. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Gefahr einer Diffusion der Luft ins Wasser nicht auszuschließen ist.

### *B-Test*

Der B-Test ist ein wichtiger Schritt in der Sättigungsphase eines gesättigten Versuchs. Er dient zu überprüfen, ob die vorgeschriebene Sättigung erreicht ist. Der zu erreichende B-Wert und die Sättigungsdauer sind die beiden wichtigsten Parameter für den B-Test. In einem B-Test wird der Äußere und der Innere Zellendruck um 50 kPa erhöht, während die Leitung „Porenwasser Unten“ zugemacht wird. Das heißt, während des Druckanstiegs in den Zellen hat die Bodenprobe nicht die Möglichkeit zu drainieren. Ein gesättigter Boden besteht aus Feststoff und Wasser, und die beiden Komponenten werden als nicht komprimierbar betrachtet. Daher wird der Druckanstieg in den Zellen gleich groß sein wie jener in der Bodenprobe, wenn sie vollgesättigt ist. In der Praxis kann keine hundertprozentige Sättigung mit Wasser erreicht werden, und der Druckanstieg im Boden wird immer etwas geringer sein als 50 kPa. Das Verhältnis aus beiden Druckänderungen entspricht dem B-Wert.

*Phasen eines Triaxialversuches*

Wie die Tabelle 5 zeigt, durchlaufen die CD-Versuche mindestens drei Phasen: Initialphase, Konsolidationsphase und Scherphase. Bei den gesättigten Versuchen kommt noch eine Sättigungsphase dazu.

	gesättigter Versuch	teilgesättigter Versuch
<b>Initialphase</b>	Aufbringung des Sättigungsdrucks	Aufbringung der Saugspannung
<b>Sättigungsphase</b>	B-Test	
<b>Konsolidationsphase</b>	Aufbringung des Konsolidationsdrucks	
<b>Scherphase</b>	Abscheren der Bodenprobe	

Tabelle 2: Phasen der Versuche

In der Initialphase wird die Bodenprobe unter einen Anfangsdruck gesetzt. Für gesättigte Versuche dient diese Phase dazu, die Luft in der Bodenprobe langsam aus dem Porenvolumen durch Wasser zu verdrängen. Bei den teilgesättigten Versuchen wird die Saugspannung mittels der Axis-Translation-Technique aufgebracht. Es muss

allerdings gewartet werden, bis sich der Luft- und Wasserdruck in der Bodenprobe gleichmäßig verteilt hat. Bei den gesättigten Versuchen folgt die Sättigungsphase der Initialphase. Der Kernbestandteil dieser Phase ist der B-Test, der besagt, ob die Bodenprobe so weit gesättigt ist, dass eine Druckänderung in den Zellen zu einer gleichen Druckänderung in der Bodenprobe führt. Die Konsolidationsphase und die Scherphase verlaufen sowohl bei teilgesättigten als auch bei gesättigten Versuchen gleich. In der Konsolidationsphase werden die Seitendrücke erhöht bis ein Zustand erreicht wird, unter dem die Bodenprobe geschert wird. Die Scherphase stellt den eigentlichen Versuch dar, worin die Bodenprobe unter dem Konsolidationsdruck mit dem Stempel zusammengedrückt wird.

## **6.2 Gerätschaft der Triaxialanlage**

Die Gerätschaft der Triaxialanlage des Instituts für Geotechnik wird in den Arbeiten der Vorgänger bereits mehrmals beschrieben, und für die vorliegende Arbeit ist die Anlage unverändert geblieben. Dafür wird dieses Kapitel an den Abschnitt „Triaxialanlage“ der Masterarbeit Dominik Schöfers 2012 angelehnt.

Diese Anlage setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Prüfpresse von Typ UL60;
- Druckstempel mit eingebauter Kraftmessdose;
- Wegaufnehmer;
- Porenwasserdrucksensor;
- elektronische Volumenmessvorrichtung;
- Double Cell Triaxialprüfzelle für Probendurchmesser von 100 mm;
- Wasser-Entgasungsanlage;
- Zwei Druckluft-Wasser-Zylinder LT 25000;
- vollautomatischer pneumatischer Druckerzeuger APC;

- automatische elektromechanische Drucksteuerung VPC;
- PC mit der Software GEOsys 8.7.7.5.

Mit dieser Triaxialanlage können verschiedene Versuche für gesättigte oder auch teilgesättigte Prüfkörper durchgeführt werden. Mögliche Versuche sind beispielsweise Scherversuche, einaxiale Druckversuche, Durchlässigkeitsversuche oder auch Drucksetzungsversuche.

Abbildung 13 zeigt eine generelle Komponentenzusammenstellung mit den jeweiligen Verbindungspunkten der Anlage des Instituts. Die wichtigsten Komponenten der Anlage werden in diesem Kapitel kurz vorgestellt.

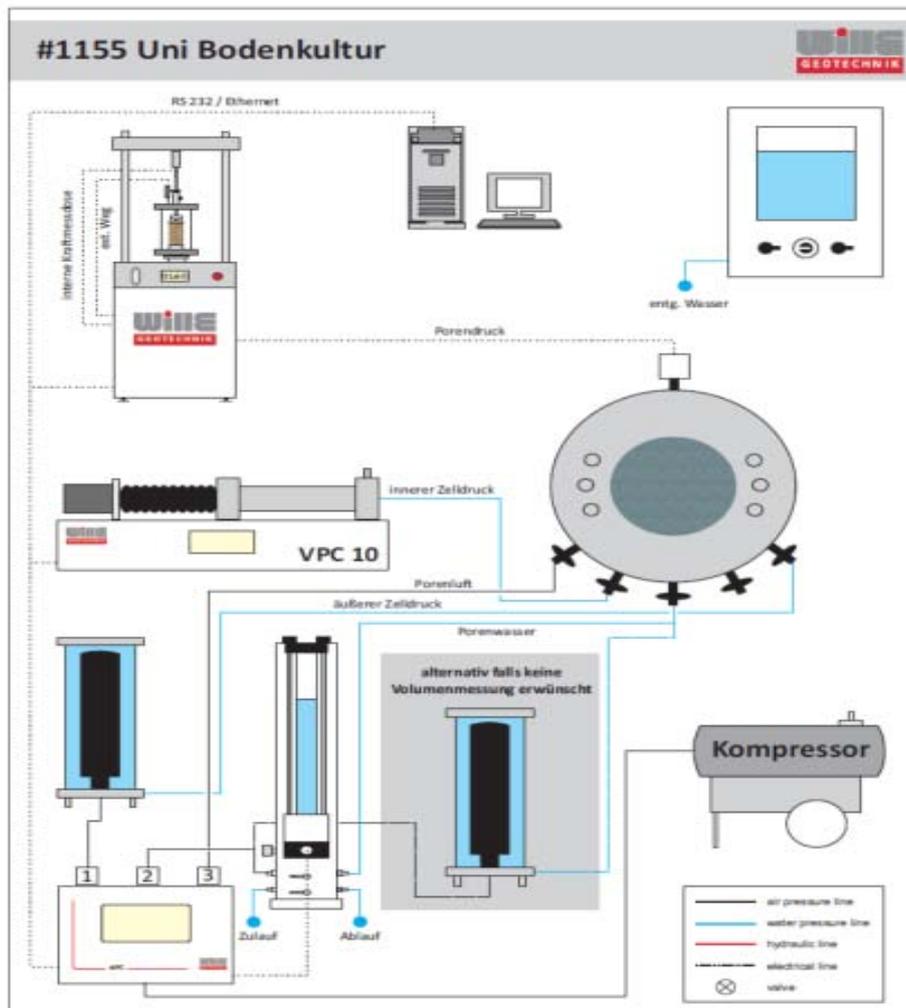


Abbildung 16: Komponentenzusammenstellung Triaxialanlage (WILLE, 2008)

## Prüfpresse UL60

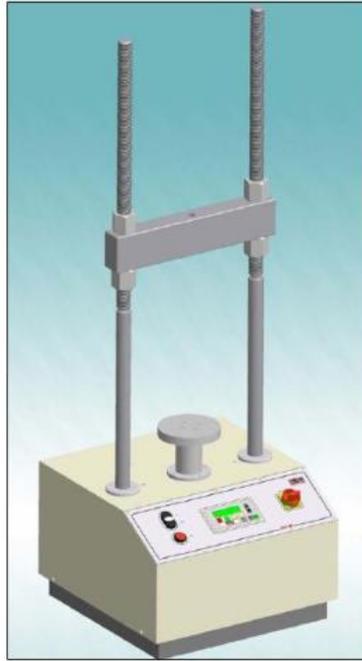


Abbildung 17: Gesamtansicht der Prüfpresse (WILLE , 2008)

Die Prüfpresse UL 60 (Abbildung 14) besteht aus einem stabilen Lastrahmen und kann Auflasten von bis 50 kN erzeugen. Für die vorliegende Abschlussarbeit wurde ein geschwindigkeitsgesteuerter Betrieb gewählt, daneben existiert noch die Möglichkeit, die Presse weggeregelt oder kraftgeregelt zu betreiben. Die Prü fzelle kann manuell oder durch PC gesteuert werden. Bevor der Versuch am Prüfstand richtig startet, kann die Prü fzelle manuell so weit hochfahren werden, dass ein leichter Kontakt zwischen Stempel und Anstoß hergestellt wird. Dieser Schritt ist aber nicht obligat, denn nach der Eingabe des Befehls am PC, den Versuch zu starten, wird die Prü fzelle automatisch von PC gesteuert und die Herstellung des Kraftschlusses wird eingeleitet.

## **Zellbodenplatte**

Die Zellbodenplatte, angezeigt in Abbildung 15, hat folgende wesentliche Komponenten:

**Gewindestangen:** Die drei Gewindestangen sind für die Verschraubung des inneren Zylinders mit der Zellbodenplatte und dem Zelldeckel zuständig.

**Basisadapter:** Der Basisadapter befindet sich in der Mitte der Zellbodenplatte, worauf sich eine schneckenartig eingefräste Drainage befindet. Auf dieser Drainage wird ein Filterstein bei gesättigten Versuchen oder eine Keramikplatte bei teilgesättigten Versuchen aufgesetzt, wobei die Keramikplatte luftdicht am Basisadapter befestigt wird. Neben dem Basisadapter sind noch zwei Schnellsteckverbindungen zu finden, an ihnen werden die Drainageschläuche der Kopfplatte in Verbindung gebracht.

**Schnellkuppelventile:** Die Bodenplatte dient nicht nur dazu, als Aufstandsfläche für die Bodenprobe und die zylindrischen Zellen zu fungieren. An ihrer Vorderseite sind mehrere Schnellkuppelventile montiert worden, und mit ihnen werden unterschiedliche Leitungen angeschlossen. Die einzelnen Schnellkuppelverbindungen sind:

Porenwasser/ Porenluft oben

Zelldruck innen

Porenwasser unten

Porenwasser/ Porenluft oben

Zelldruck außen

An der Rückseite der Zellbodenplatte befindet sich eine weitere Verbindung, an der der Porenwasserdrucksensor befestigt wird.

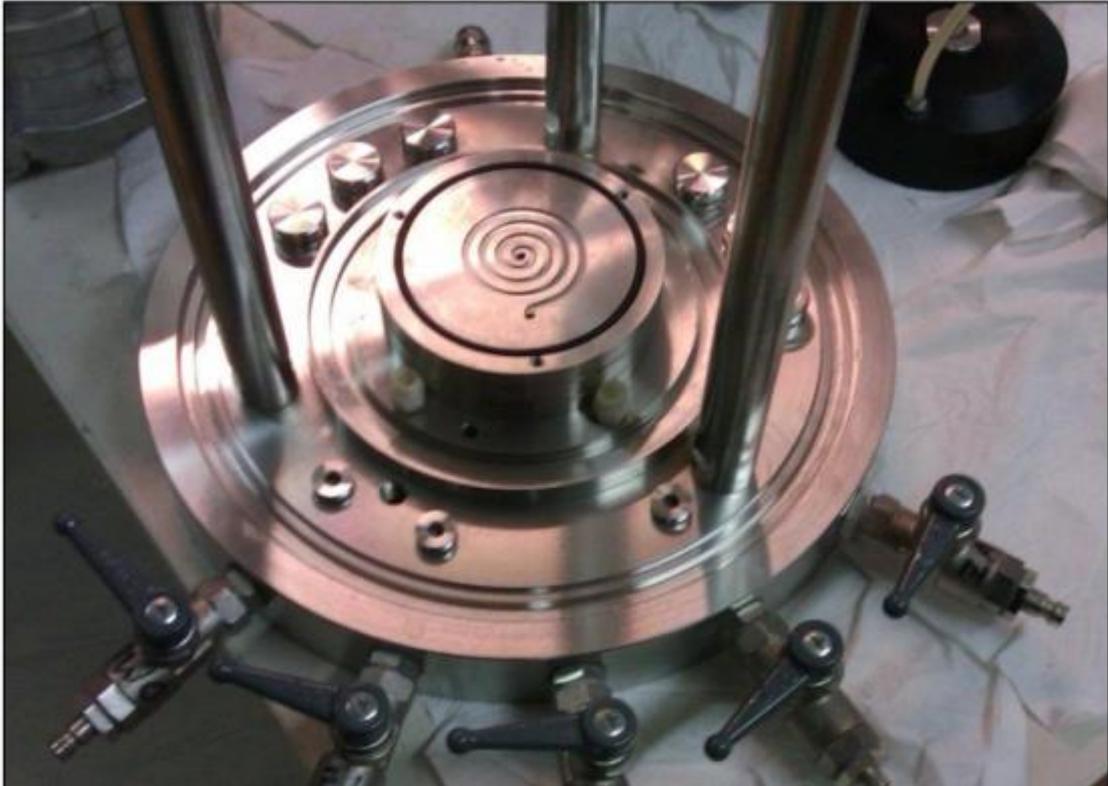


Abbildung 18: Zellbodenplatte der Triaxialprüfzelle

### Vollautomatischer pneumatischer Druckerzeuger APC



Abbildung 19: Ansicht APC (Schöfer, 2012)

Der Einsatzbereich des vollautomatischen, pneumatischen Druckerzeugers (Abbildung 16) liegt im Bereich bis ca. 10 bar (mit vorhandenem Kompressor 7 bar). Das Gerät hat drei unabhängige Kanäle, und über sie können jeweils separat Sollwerte eingestellt werden. Diese drei Kanäle sind wie folgt belegt:

- Kanal 1: Zellmantel außen;
- Kanal 2: Porenwasser oben / Porenluft oben;
- Kanal 3: Porenwasser unten.

Die APC lässt sich, wie die Prüfpresse, manuell bedienen. Jedoch wird die manuelle Bedienung der APC oft erst dann eingesetzt, wenn ein Fehler auftritt. Erfolgt die Drucksteuerung über den Computer, so wird diese über das Programm GEOsys automatisch gesteuert. Es ist möglich, den Sollwert während der PC- Steuerung zu verändern. Wenn beispielsweise der Druck in der Außenzelle hängenbleibt, erfolgt der Korrektur über der Handbedienung von GEOsys, aber nicht manuell am Gerät.

### **Automatische, elektromechanische Drucksteuerung VPC**

Das in Abbildung 17 dargestellte Gerät dient zur elektromechanischen Druckerzeugung. Hierbei wird der Druckkolben im Zylinder durch einen Präzisions-Schrittantrieb bewegt. Zur Druckerzeugung können nicht aggressive Flüssigkeiten und Gase eingesetzt werden. Für die durchgeführten Versuchsreihen wurde entlüftetes Wasser verwendet.



Abbildung 20: Ansicht VPC (WILLE, 2008)

Die Druck- und Volumenmesseinrichtung VPC kann in der vorhandenen Konfiguration einen maximalen Druck von 10 bar erzeugen und regelt den inneren Zelldruck.

Die VPC-Anlage lässt sich sowohl manuell, als auch durch PC steuern. Die Regelung des inneren Zelldrucks während eines Triaxialversuchs wird ausschließlich durch PC gesteuert. In folgenden Fällen ist die manuelle Bedienung von wesentlicher Bedeutung:

Auffüllen der VPC mit entlüftetem Wasser

Entleeren des Wassers in der VPC

Fahren zu einer richtigen Ausgangsposition

Bevor die VPC-Anlage mit dem entlüfteten Wasser aufgefüllt wird, wird das Feinregulierventil aufgemacht und der Zylinderkolben bis zum rechten Ende gefahren, um das nicht mehr benötigte Wasser vollständig aus der Anlage zu pressen. Danach wird sie bis zum linken Ende gefahren und mit der Leitung „Water-Outlet“ der Entgasungsstation angeschlossen. Das Ventil bleibt offen. Dreht man den Hahn auf der Entgasungsstation auf „Auslass“, strömt entlüftetes Wasser in die VPC. Es dauert nur kurz, bis Wasser aus der VPC ausströmt. Nun wird die Anlage in eine Schräglage gebracht und nochmals mit Wasser aufgefüllt, um mögliche Luftblasen mit ausströmendem Wasser aus dem System zu bringen. Danach wird das Ventil wieder

zugemacht, so bleibt die VPC-Anlage wassergesättigt. Die Anfangsposition des Zylinderkolbens der Anlage variiert je nach den Rahmenbedingungen der Versuche. Bei locker gelagertem Boden wird die Bodenprobe in einem Kompressionsversuch ständig verdichtet. Das bedeutet, dass mehr Druck benötigt wird, um den vorgeschriebenen Druck aufrechtzuerhalten. In diesem Fall ist es empfehlenswert, eine Anfangsposition zu wählen, die weit links ist. Dichte Böden dehnen sich nach einer kleiner Verdichtungsphase wieder auf und hier kann die Anfangsposition mittig gewählt werden.

Neben der wichtigen Funktion, den inneren Zelldruck zu steuern, hat die VPC Anlage bei den teilgesättigten Versuchen noch die zentrale Aufgabe, die Änderung des Porenvolumens zu messen. Da Luft sich komprimieren lässt, kann die Änderung des Porenvolumens nicht durch elektronische Volumenmesser erfasst werden. Die doppelzellige Konfiguration mit gleichem Innen- und Außenzelldruck gewährleistet, dass die Innenzelle sich in Zuge des Versuchs nicht verformt. Ein teilgesättigter Boden besteht aus drei Stoffelementen: Feststoff, Wasser und Luft und wird vereinfacht als ein Drei-Phasensystem beschrieben, ohne die mögliche gemischte Phase aus Luft und Wasser zu berücksichtigen. Die Änderung des Volumens einer Bodenprobe in diesem Fall also aus der Volumenänderung der Luft und des Wassers der Probe resultieren. Wenn die Bodenprobe komprimiert wird und sich dabei verformt, verringert sich ihr Porenvolumen. Infolge dessen treten Wasser und Luft aus der Bodenprobe heraus, und die VPC-Anlage reagiert auf diese Änderungen. Im Falle einer Kompression bewegt sich der Zylinder der VPC-Anlage nach rechts, und gerade diese Volumenänderung, die sich aus der Kolbenfläche und dem zusammengepresstem Weg ergibt, entspricht der Änderung des Volumens ungesättigter Böden. Allerdings muss dazu noch eine Korrektur gemacht werden, die bei der Setzung des Stempels hervorgerufen ist. Der Wegaufnehmer zeichnet die axiale Setzung des Prüfkörpers als Höhe auf, multipliziert sie mit der Stirnfläche des Stempels, erhält man das Setzungsvolumen. Die durch VPC gewonnene Volumenänderung ist noch vom Setzungsvolumen zu abstrahieren.

## Elektronische Volumenmessvorrichtung



Abbildung 21: Elektronische Volumenmesseinrichtung (Schöfer, 2012)

Die elektronische Volumenmesseinrichtung (Abbildung 18) besteht aus zwei Säulen. Der innere Zylinder wird als Bürette bezeichnet, die ein Messvolumen von 100 ml besitzt und für die Volumenmessung verantwortlich ist. Die Bürette wird mit einem Systemdruck beaufschlagt, was auch als Backpressure bezeichnet wird. Der äußere Zylinder, der die Messbürette umgibt, wird als Chamber genannt. Diese kann einerseits als Wasserreservoir fungieren, andererseits übt sie einen Gegendruck auf die Messbürette aus. Die Volumenmessung gesättigter Böden durch die elektronische Volumenmesseinrichtung unterliegt einem einfachen Prinzip: Da in den Poren eines gesättigten Bodens nur Wasser vorhanden ist, und Wasser quasi nicht komprimierbar ist, entspricht die Änderung des Bodenvolumens durch Belastung der Änderung des Wasservolumens.

In der Initialphase eines gesättigten Versuchs übt die Volumenmesseinrichtung einen Backpressure auf die Bodenprobe aus, um diese mit Wasser aufzusättigen. Da die Luft in den Porenvolumen des Prüfkörpers nach und nach von Wasser, welches von der elektronischen Volumenmesseinrichtung stammt, verdrängt wird, muss gewährleistet

werden, dass die zwei Zylinder relativ voll aufgefüllt werden. Allerdings muss noch die Lagerung der Bodenprobe berücksichtigt werden. Ein locker gelagerter Boden wird im Zuge des Kompressionsversuchs zusammengedrückt und Porenwasser wird durch die Kompression aus den Boden gepresst. Daher soll in der Messeinrichtung mehr Platz freigelassen werden, als bei dichtem Boden. Wenn die Messbürette mit Wasser vollgefüllt wird, kann die Funktion der Volumenmessung nicht mehr wahrgenommen werden.

### **Druckluft-Wasser Zylinder LT 25000**

Der Druckluft-Wasser Zylinder LT 25000 versorgt die Außenzelle mit Druck über APC, er wird auch als Medienwandler bezeichnet, da mit seiner Hilfe die mit Luft gefüllte Gummimembran den aufgebrauchten Druck über das Wasser im Zylinderraum an die angeschlossene Zelle weitergibt. Der Vorteil, den Außenzellendruck über Medienwandler zu applizieren, liegt darin, dass es zu keinem direkten Kontakt von Luftdruck und Wasser kommt und daher keine Luft bei hohem Druck in Lösung gehen kann. In Abbildung 19 sind zwei Zylinder zu sehen. Der hinten stehende Zylinder ist wichtig für Versuche, mit denen der K-Wert bestimmt wird, und er wird für Versuche in der vorliegenden Arbeit nicht eingesetzt.



Abbildung 22: Druckluft-Wasser Zylinder und Volumenmessenrichtung

### **Wasser-Entgasungsanlage**

Das Institut für Geotechnik besitzt eine Wasser-Entgasungsanlage (Abbildung 20), mit der Leitungswasser entlüftet wird. Dieses ist für eine optimale Sättigung des eingebauten Prüfkörpers und zum reibungslosen Betrieb der Triaxialprüfzelle notwendig.

Zunächst wird Leitungswasser in Kübeln bereitgestellt, inzwischen kann die Entgasungsanlage mit einer Vakuumpumpe auf einem Druckniveau von 0.6 Bar gefahren werden. Mit diesem Unterdruck wird das Wasser in die Anlage angesaugt. Erfahrungsgemäß werden mehr als zwei Kübeln Wasser benötigt, um die Anlage ausreichend zu befüllen. Die Wasser-Entgasungsanlage ist am Institut in einer Höhe

von etwa 1.50 m an der Wand montiert. Aufgrund dieser Höhendifferenz zu den anderen Bestandteilen des Versuchsgerätes können die zu befüllenden Zellen und Apparaturen rein durch den hydraulischen Druckgradienten bedient werden. Dieser Höheunterschied kann theoretisch dafür genutzt werden, die Bodenprobe durch den hydraulischen Gradienten zu sättigen.



Abbildung 23: Wasser-Entgasungsanlage (Schöfer, 2012)

### **Double Cell Triaxialprüfzelle für Probendurchmesser von 100 mm**

Die am Institut für Geotechnik verwendete Triaxialprüfzelle setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Zellbodenplatte mit Basisadapter für einen Prüfkörperdurchmesser von 100 mm, fünf Schnellkuppelventile an der Vorderseite und ein Schnellkuppelventil an der Rückseite für den Porenwasserdrucksensor;
- drei Gewindestangen für die Fixierung des Zelldeckels mit der Zellbodenplatte;
- Zelldeckel mit integriertem Druckstempel mit Kraftmessdose;

- innerer Klarsichtzylinder mit einem Durchmesser von 130 mm;
- äußerer, verstärkter Klarsichtzylinder mit einem Durchmesser von 220 mm



Abbildung 24: Triaxialprüfzelle

### **Porenwasserdrucksensor**

Der in Abbildung 22 dargestellte Porenwasserdrucksensor kann für Wasserdrücke zwischen 0 und 10 bar eingesetzt werden. Der Porenwasserdrucksensor wird mit Hilfe eines Schnellkuppelventils am hinteren Ende der Zellbodenplatte angeschlossen. Vor Versuchsstart muss der Sensor wie die meisten anderen Geräte entlüftet werden, um die unverfälschten Messwerte, welche durch Lufteinschlüsse verfälscht werden, zu

vermeiden. Das Sättigen des Sensors geschieht nach Einbau der Probe in die Triaxialprüfzelle und Vollenfüllung der Außen- und Innenzelle, dabei wird die Leitung der Entgasungsanlage an das Schnellkuppelventil „Porenwasser unten“ angeschlossen und das Ventil geöffnet. Die Drainageleitung am Porenwasserdrucksensor wird geöffnet und das entlüftet Wasser kann durch den Sensor durchgeströmt werden. Wenn aus der Drainageleitung keine Luftblasen mehr ausströmen, kann die Drainage wieder geschlossen und die Leitung der Entgasungsanlage entfernt werden.



Abbildung 25: Porenwasserdrucksensor (Schöfer, 2012)

### **6.3 Versuchsphase-Herstellung der Probe**

Die Probeherstellung ist der erste und auch ein wichtiger Teil eines Triaxialversuchs, welche nicht am Prüfstand geschieht. Die Qualität der Probeherstellung bestimmt direkt die Qualität der Versuchsergebnisse. Diese Phase kann wiederum grob in zwei feinere Schritte unterteilt werden. Zunächst wird die Herstellung der Bodenprobe durchgeführt. Der zweite Schritt ist der Einbau der verdichteten Bodenprobe in das Triaxialgerät.

Der Wassergehalt des Bodens muss als Erstes identifiziert werden, damit der Differenz zwischen dem aktuellen Wassergehalt und dem Proctorwassergehalt, der einheitlich für die Versuche gewählt wird, bestimmt wird. Die Bestimmung des Wassergehalts der Bodenprobe erfolgt konventionell mit dem Trockenschrank. Die Bodenprobe wird mit

105 Grad im Trockenschrank über Nacht getrocknet, um eine Aussage über den Wassergehalt zu machen. Der Eimer muss jedoch immer verschlossen bleiben, damit die Änderung des Wassergehalts durch Verdunstung unterbunden ist.

Da der frische Prüfboden in dicht verschließbaren Plastikeimern gelagert ist, und der Wassergehalt des Bodens sich unter dieser Bedingung nicht ändern soll, wird die Annahme getroffen, dass der Wassergehalt des Prüfbodens innerhalb des Plastikeimers gleichmäßig verteilt ist. Die homogene und gleichmäßige Verteilung des Wassers im Eimer ist die Voraussetzung für die Bestimmung des Wassergehalts mittels einer Stichprobe aus einem Eimer.

Nach Beenden eines Versuchs kann die zerstörte Bodenprobe für weitere Versuche eingesetzt werden. Diese gebrauchte Bodenprobe weist oft einen höheren Wassergehalt als vorgeschrieben auf. Da mehrere gebrauchte Bodenproben in einem Eimer bewahrt werden, mischen sie sich miteinander, das Wasser folgt dem Gradient und bewegt sich vom Ort mit höherem Wassergehalt zum Ort mit niedrigerem Wassergehalt, weshalb es durch das Durchmischen der Bodenproben zu einer Homogenisierung des Wassergehalts kommt.

Das volle Gefäß von Bodenmassen mit unterschiedlichem Wassergehalt wird anschließend in eine Mischmaschine geleert. Mit deren Hilfe werden die Bodenmassen intensiv durchgemischt. Die trommelartige Mischmaschine im geotechnischen Labor auf der BOKU ist mit Leisten versehen, die hauptsächlich zu der Durchmischung beitragen. Da die Bodenmasse durch die Rotationsarbeit der Zentrifuge zu runden „Bodenkugeln“ geformt wird, muss die geballte Bodenmasse bei der Probeherstellung zerdrückt werden, denn anderenfalls könnten diese Bälle zu lokaler Heterogenität der Bodenstruktur und nicht einheitlichem Wassergehalt in der Probe führen. Danach werden die Eimer mit Boden befüllt. Es bedarf nur einer Stichprobe aus einem Eimer, um seinen Wassergehalt festzulegen. Der gemessene Wassergehalt wird auf dem jeweiligen Eimer beschriftet.

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgt durch Wiegen von Schüsseln, feuchten Bodenmassen mit Schüssel und den getrockneten Bodenmassen mit Schüssel. Aus den Differenzen ergibt sich der aktuelle Wassergehalt. Die Differenz zwischen dem

aktuellen und dem geforderten Wassergehalt wird abgeglichen, um den vorgesehenen Proctorwassergehalt zu erreichen. Die Wasserzufuhr soll in der Bodenprobe gleichmäßig verteilt sein, und die Wasserzugabe soll nicht auf der Waage geschehen. Denn das würde die Messung stören und die Funktionstüchtigkeit des Instruments negativ beeinflussen. Um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers in der Bodenmasse zu erreichen, wird der Boden in ein großes Fach platziert, weil durch eine große Oberfläche ermöglicht wird, dass Wasser gleichmäßig und gut verteilt zugegeben werden kann. Dabei soll beachtet werden, dass die Bodenprobe aus dem Behälter nicht verloren geht. Außerdem ist es bei der Durchmischung unvermeidbar, dass das nasse Bodenmaterial am Arbeitsinstrument klebt, und es dadurch ebenfalls zu einem gewissen Verlust an Boden kommt. Diese Faktoren können die Genauigkeit des Versuchs negativ beeinflussen, weil sonst der bestimmte Wassergehalt aufgrund des abweichenden Gewichts nicht exakt der Vorgabe entspricht. Es ist jedoch fast unvermeidbar, dass Teile von Bodenmassen verloren gehen.

Um der formlosen Bodenmasse eine Gestalt zu verleihen, welche für das Triaxialgerät tauglich ist, müssen die Bodenmassen mit Hilfe eines Proctor- Hammers geformt werden. Die Schlaganzahl kann aus dem Proctorversuch (Schöfer, 2012) durch Umformen der Formel für die Verdichtungsenergie bestimmt werden:

$$E = n_1 * n_1 * G * h_f / V$$

Die tatsächlich benötigte Schlaganzahl kann aber vom Ergebnis der Berechnung abweichen. Außerdem soll die berechnete Schlaganzahl als eine Vorhersage dienen. Die tatsächliche Schlaganzahl ergibt sich aus der zu erreichenden Schichtdicke. Diese ist wiederum abhängig von den Bedingungen des Probeeinbaus. Für den Einbau der Bodenprobe kann zwischen lockerer und dichter Probe unterschieden werden. Um die Bodenmasse zu bestimmen, die für jede Schichte zum Verdichten benötigt wird, muss zunächst das Volumen der Bodenprobe berechnet werden.

$$D = 101,4 \text{ mm}$$

$$H = 206,5 \text{ mm}$$

$$V = \pi * D * D * H / 4 = 1667,577 \text{ cm}^3$$

Es wurde eine Trockendichte von 1,61 g/ cm<sup>3</sup> für einen lockeren Boden und 1,86 g/ cm<sup>3</sup> für einen dichteren Boden gewählt; das ergibt sich aus einer Wahl von 85% und 98% der maximalen Proctordichte und so kommt es zu der Zielmasse von 2685 g bzw. 4967 g. Nun muss der Zielwassergehalt auf den entsprechenden Proctorwassergehalt eingestellt werden. Das bedeutet, aus dem aktuellen Wassergehalt der Bodenmasse, der normalerweise niedriger als der Proctorwassergehalt ist, wird die fehlende Wassermenge berechnet und sie der Bodenmasse hinzugefügt. Nachdem die endgültige Bodenmasse mit dem Einhalten des Zielwassergehalts erreicht wird, wird das für jede Schicht benötigte Gewicht des Bodens berechnet. Da in diesem Fall zum Einbau der Bodenprobe acht Lagen benötigt werden, ergibt sich eine Bodenmasse pro Schicht von ungefähr 400 Gramm.

Ziel bodenmechanischer Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit ist, in Bodenproben möglichst homogene Spannungszustände zu erzeugen. Diese homogenen Spannungszustände setzen die Homogenität des Bodens voraus, was eine Aufgabe der Probeherstellung ist. Das Durchmischen von Wasser und Boden erfolgt ebenfalls nach dem Prinzip homogener Verteilung. Die Farbe und das Gefüge des Bodens geben grobe Hinweise darauf, ob der Boden ganz trocken oder relativ feucht ist, und dieses Zeichen kann zu einer homogenen Verteilung der Feuchte beitragen. Das heißt, der fertig durchgemischt Boden soll im Großen und Ganzen eine einheitliche Farbe aufweisen. Bevor man mit dem Verdichten der Bodenprobe anfängt, soll der Behälter auf einer starren Unterlage liegen, damit die zum Verdichten eingeführte Energie möglichst weitgehend vom Boden aufgenommen wird, um optimale Ergebnisse zu erhalten. Gewöhnlicherweise findet der Verdichtungsprozess in einer Proctoranlage statt und dabei wird ein zylindrischer Behälter herangezogen. Dieser Stützzylinder setzt sich zusammen aus drei Segmenten zu je 120 Grad, und er kann mittels eines Klemmringes am unteren Ende und am oberen Ende mit einem Aufsatzring befestigt werden, damit die Form des Behälters trotz der dynamischen Energie aufrecht bleibt. Der zusammengebaute Stützzylinder wird auf einer stahlscheibenförmigen Bodenplatte fixiert, wobei auf die Bodenplatte meist ein Blatt Papier als Unterlage gegeben wird, damit keine Bodenmasse an der Anlage haftet.

Zunächst wird die Menge der Bodenmasse, die für jede Schicht zu verdichten ist, in den Behälter gegeben. Die Oberfläche der Bodenmasse soll möglichst eben geglättet werden, um zu vermeiden, nach der Verdichtung einen schiefen Bodenkörper zu bekommen. Danach wird eine Stahlplatte, die einen etwas kleineren Durchmesser als der Behälter hat, auf den Bodenmassen aufgesetzt, auf welche der Proctorhammer schlägt. Nach Erreichen des Zielzustandes jeder Schicht, der als Höhe ausgedrückt wird, wird zuerst die Stahlplatte herausgeholt. Es soll darauf geachtet werden, dass die Bodenteile, die durch den Verdichtungsprozess an der Stahlplatte haften, wieder in den Behälter kommen. Bevor die nächste Schicht eingebaut wird, soll die glatte Oberfläche der Bodenmasse mit einem Messer aufgeraut werden, um eine bessere Verzahnung zwischen den beiden Schichten zu schaffen. Es wird angestrebt, dass die pro Schicht aufgebrauchte Verdichtungsenergie ungefähr gleich bleibt.

Nachdem die Verdichtung der Bodenprobe abgeschlossen ist, können die Schalen des zylindrischen Behälters vorsichtig entfernt werden. Dies erfolgt durch leichtes Klopfen an den Flanschen der Schalen. Es muss davor noch beachtet werden, dass die Oberfläche der geformten Bodenprobe eben abgeglichen wird. Dies ist wichtig, um einen guten Anschluss und eine bessere Kraftverteilung zwischen der Bodenprobe und dem Triaxialgerät zu ermöglichen.

## **6.4 Versuchsphase-Einbau der Probe ins Triaxialgerät**

Nun muss das Triaxialgerät so eingerichtet werden, dass der Versuch gestartet werden kann. Die Entlüftungsanlage wird zunächst bis zu dem markierten Stand mit Leitungswasser befüllt und mittels einer Vakuumpumpe entlüftet. Die Befüllung mit Wasser über die Zugangsleitung und die Entgasung geschieht gleichzeitig, nachdem die Vakuumpumpe einen Unterdruck erzeugt hat. Es ist notwendig, dass sich die Wasserzugangsleitung immer in der Flüssigkeit befindet. Es kommt manchmal dazu, dass das restliche entfülltete Wasser nach einem Versuch für einen längeren Zeitraum unbenutzt bleibt. In diesem Fall soll man die Anlage mit frischem Wasser neu befüllen.

Zu Beginn des Operierens mit dem Triaxialgerät, bevor die Bodenprobe eingebaut wird, muss darauf geachtet werden, dass gewisse Reinigungs- oder Wartungsarbeiten

geleistet werden. Diese Instandhaltungsarbeiten können in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe umfasst jene Reinigungsarbeiten, die nach jedem Versuch bzw. vor jedem neuen Versuch erledigt werden, zum Beispiel das Triaxialgerät von Verunreinigungen zu befreien. Das betrifft vor allen die Eintiefungen unterhalb der Keramikplatte und jene für die innere und äußere Zelle. Nach einem Versuch lagert sich Bodenmaterial in den Eintiefungen ab, was einen negativen Einfluss auf die Dichtheit ausüben kann. Deswegen müssen sowohl die Eintiefungen als auch die Verdichtungsringe gut gereinigt werden. Zur zweiten Gruppe gehören die Wartungsarbeiten, die in einem regelmäßigen Intervall geleistet werden sollen. Darunter fallen Arbeiten wie das Austauschen der Flüssigkeit im Medienwandler. Je nach Versuchstyp werden unterschiedliche Materialien benötigt, das heißt im Konkreten: Für einen gesättigten Versuch muss auf der untersten Stelle ein scheibenförmiger poröser Filterstein platziert werden, während der ungesättigte Versuch eine Keramikplatte mit hohem Lufteintrittspunkt benötigt. Die Keramikplatte muss allerdings mit drei Schrauben fest an dem Basisadapter befestigt werden. Wichtig ist, dass sowohl der Filterstein als auch die Keramikplatte stets mit dem entlüfteten Wasser gesättigt werden. Auch das Festschrauben der Keramikplatte dient dazu, Lufteintritte zu vermeiden. In einem ungesättigten Versuch soll die Keramikplatte dazu beitragen, dass trotz bestimmter Größe des Porenluftdrucks keine Luft ins System der Wasserversorgung eindringt. Im Prinzip werden alle möglichen Lufteinschlüsse im System eines Triaxialgerätes reduziert und minimiert.



Abbildung 26: Spannzylinder

Nachdem die Bodenprobe auf der Grundplatte platziert ist, wird nun ein Spannzylinder herangezogen (Abbildung 23). Dieser Spannzylinder hat einen Durchmesser, der ein wenig größer ist als der Durchmesser der Bodenprobe, und hat seitlich eine kleine Öffnung, an der ein Schlauch angeschlossen ist. Die Bodenprobe wird während des Versuchs von einer Gummi-Membran umgeben, diese Membran muss vor dem Einbau visuell auf Dichtheit überprüft werden. Die Gummi-Membran wird zunächst an dem Spannzylinder befestigt, und zwar dadurch, dass die innere Seite der beiden Enden der Membran auf der Mantelfläche des Spannzylinders umgehüllt und mit Gummiringen befestigt wird. Es ist wichtig, dass an beiden Enden ungefähr gleich viel Gummi-Membran umgefaltet wird. Nun kann die Prüfprobe von der Proctoranlage zum Prüfstand gebracht werden, sodass die Probe während der anfänglichen Vorbereitung nicht gestört wird. Die Gummi-Membran samt Spannzylinder kann nun über die Bodenprobe gezogen werden, indem am Schlauch gesaugt und dabei ein Unterdruck erzeugt wird, damit die Gummi-Membran schlüssig an der inneren Wand des Spannzylinders haftet. Mit Hilfe eines Pinsels lässt sich allfällig heruntergefallenes Bodenmaterial schnell entfernen. Ebenfalls empfiehlt es sich, um die Bodenprobe herum einige Papiertücher als Unterlage zu legen. Das ist wichtig, damit der Basisadapter des Triaxialgeräts immer trocken bleibt, denn es ist viel schwieriger die

feuchten Bodenpartikeln zu reinigen. Danach können die O-Ringe, die zuerst die Membran fixieren, von ihr hinweggeschoben werden, und die umgefaltete Gummi-Membran wird wieder in die ursprüngliche Form gebracht. Die Gummi-Membran soll selbstverständlich etwas länger als die Höhe der Bodenprobe sein, damit die Probe vollständig von der Gummi-Membran gedeckt wird, um Luftzutritt in die Bodenprobe zu verhindern. Aber sie soll nicht zu lange sein, da sonst viel umgefaltet werden müsste, um sie an die Höhe der Bodenprobe anzupassen. Erhöhte Dicke der Gummi-Membran infolge des mehrfachen Faltens kann dazu führen, dass die Drehverschlüsse der zwei Drainageschläuche an der Kopfplatte schwer mit den Steckverbindungen auf der Bodenplatte angeschlossen werden können.



Abbildung 27: Triaxialzelle (Schöfer, 2012)

In den zwei Rillen auf der Mantelfläche der Kopfplatte und der Bodenplatte lassen sich die O-Ringe platzieren. Die zwei Drainageschläuche werden gekreuzt mit Steckverbindungen angeschlossen. Der innere Zylinder wird nun über die Bodenprobe auf die vorgesehene Eintiefung platziert, dabei darf der Dichtungsring nicht gequetscht und verunreinigt werden. Die Kraftmessdose samt Zeldeckel wird aufgesetzt. Der Deckel wird mit Beilagescheiben und Hutmuttern mit den drei Stativstangen fixiert. Ganz wichtig ist es zu vermeiden, dass eine Schraube ganz fest angezogen wird, bevor mit den restlichen angefangen wird. Bevor die Außenzelle aufgebracht wird, muss ebenfalls die Dichtung kontrolliert werden. Sowohl der Dichtungsring auf dem Basisadapter, als auch der auf der Stirnseite muss frei von Unreinheiten sein und darf nicht verdreht sein. Das Stromkabel der Kraftmessdose muss so angeordnet sein, dass es das Aufsetzen der Außenzelle nicht behindert und selbst nicht beschädigt wird. Nachdem die Kraftmessdose mittig auf der Kopfplatte sitzt, ist ein geringer Kontakt zwischen dem Druckstempel und der Einkeilung auf der Kopfplatte notwendig, um die Bodenprobe in Position zu halten. Die Fixierschraube für den Druckstempel bleibt solange fixiert, bis der Versuch startet. Auf der Außenzelle befinden sich zwei sternförmige Griffschrauben. Sie dienen dazu, am Ende eines Versuchs die Außenzelle nach oben zu heben, indem sie gegen den Deckel der Kraftmessdose gegengeschraubt werden. Zu Beginn des Versuchs müssen sie soweit herausgeschraubt werden, dass die Außenzelle schlüssig auf der Bodenplatte aufsitzt. Es ist zu empfehlen, diese Schrauben vor dem Versuch komplett vom Triaxialgerät zu entfernen, denn während eines Versuchs haben die Sterngriffschrauben keine Funktion. Die Dichtheit zwischen der Außenzelle und der Bodenplatte muss durch das Verschrauben mit Beilagscheiben und Muttern zusätzlich gewährleistet werden.

## **6.5 Vorbereitung der Zelle am Prüfstand**

Nun kann die fertig verschraubte Prü fzelle zur Prüfpresse gebracht werden, worauf sich der Schwerpunkt der Vorbereitungsarbeit verlagert. Der nächste Schritt ist, alle Verbindung zwischen der Prü fzelle, der Prüfpresse und anderen Geräten herzustellen. Das Kabel der Kraftmessdose wird an der Rückseite der Prüfpresse verbunden und verschraubt. Der Wegmesser wird an den Flansch, der sich an der Stativstange des

Druckstempels befindet, befestigt. Es muss darauf geachtet werden, dass der Messstift für den bevorstehenden Versuch genügend Spielraum nach oben hat. Es soll aber vermieden werden, dass der Messstift gar keinen Spielraum hat, sonst führt eine vorübergehende Volumenzunahme gleich zu einem Versuchsabbruch. Weiteres soll der Wegaufnehmer nicht von der Traverse der Prüfpresse behindert wird.

An der Zellbodenplatte befinden sich einige Schnellkupplungen. Sie ermöglichen es, Außenzelle, Innenzelle und Bodenprobe in Verbindung zu setzen. Um die Innenzelle mit entlüftetem Wasser zu befüllen, wird an die Schnellkupplung für die Innenzelle an der Zellbodenplatte zunächst der Auslassschlauch der Entgasungsanlage, die bereits mit entlüftetem Wasser befüllt wurde, angeschlossen. Bei der Entgasungsanlage wird „Water outlet“ eingestellt, am oberen Ende der Außenzelle wird ein Entlüftungsventil geöffnet und die Ventile der Triaxialzelle werden für die Innenzelle geöffnet. Nun kann das entlüftete Wasser in die Innenzelle strömen. Wenn die Innenzelle voll befüllt ist, überläuft das Wasser und es tritt aus dem Feinreguliertventil heraus. Es empfiehlt sich, das Ventil nicht sofort zu schließen, denn einige in der Zelle befindliche Luftblasen sollen somit entfernt werden. Luft ist im Triaxialsystem zu vermeiden, und ebenfalls soll bei Befüllen von Zellen darauf geachtet werden, dass das Wasser möglichst frei von Luftblasen ist. Nachdem die Innenzelle mit Wasser befüllt ist, kann die Außenzelle nach der gleichen Methode befüllt werden, wobei sich nur zwei Belüftungsventile am Deckel der Außenzelle befinden und anstatt mit dem Schnellkuppelventil „Innenzelle“ wird der Auslassschlauch mit dem Ventil „Außenzelle“ verbunden. Nachdem die beiden Zellen befüllt sind, kann der Porenwasserdrucksensor auf der Rückseite der Zellbodenplatte mit dem Schnellkupplungsventil verbunden werden. Auch der Porenwasserdrucksensor muss vor Beginn des Versuchs entlüftet beziehungsweise gesättigt werden. Dabei wird das entlüftete Wasser aus der Entgasungsanlage mittels Schnellkupplungsventil „Porenwasser Unten“ zum Porenwasserdrucksensor geleitet. Das Feinreguliertventil am Porenwasserdrucksensor wird so lange geöffnet bis sichergestellt werden kann, dass das aus der Messvorrichtung fließende Wasser keine Luftbläschen enthält. Jetzt kann die Presse eingeschaltet werden. Die Steuerung der Presse kann auf manuell eingestellt werden, und mittels der Steuerungsknöpfe kann die Bewegungsgeschwindigkeit des

Druckstempels graduell bestimmt werden. Da nur ein leichter Kontakt zwischen dem Druckstempel und der Kopfplatte hergestellt werden soll, kurz vor dem Kontaktpunkt die Anstiegsgeschwindigkeit so langsam zu wählen, dass ein rechtzeitiges Halten der Presse möglich ist, um den leichten Kontakt zu gewährleisten.

Dann werden die restlichen Geräte wie APC, Medienwandler, VPC und elektrische Volumenmesser mit der Triaxialprüfzelle in Verbindung gebracht. Es ist wichtig, festzustellen, dass diese Geräte sich in einem optimalen Zustand befinden, bevor sie im Einsatz gebracht werden.

Bei der elektrischen Volumenmeseinrichtung soll vor dem Versuchsbeginn überprüft werden, ob das entlüftete Wasser, welches sich in der elektrischen Volumenmeseinrichtung befindet, frei von Luftblasen ist. Wenn Luftblasen zu finden sind, muss das Wasser ausgewechselt werden. Dabei wird das alte Wasser über die Auslassleitung aus der Volumenmeseinrichtung entleert werden und das entlüftete Wasser kann Chamber und Bürette befüllen, wenn die Zugangsleitung mit dem Auslassschlauch der Entgasungsanlage verbunden ist und der rechte Hahn der Entgasungsanlage auf „Water-outlet“ gedreht wird. Es ist je nachdem, ob es sich um einen gesättigten oder ungesättigten Versuch, einen Versuch mit einem lockerem oder dichten Boden handelt auf den Füllstand zu achten, denn in einem gesättigten Kompressionsversuch strömt viel Wasser aus der Volumenmeseinrichtung in die Zelle, während beim Versuch mit lockerem Boden Wasser in die Volumenmeseinrichtung fließt. Ob Wasser aus der Bodenprobe in die Messeinrichtung fließt hängt, zusammengefasst, von der Volumenänderung der Bodenprobe ab. Wenn ein Triaxialversuch mit einer voll vom Wasser befüllten Volumenmeseinrichtung beginnt und im Lauf des Versuchs Wasser der Bürette überläuft, kann keine Volumenmessung durchgeführt werden.

Im Großen und Ganzen unterscheidet sich die Versuchsanordnung eines teilgesättigten Versuchs von einem vollgesättigten Versuch, was den Anschluss zwischen der Gerätschaft und Prüfzelle betrifft, nur darin, dass die Leitung der APC für Porenluft(blau) bei teilgesättigtem drainiertem Versuch mit dem Ventil Porenwasser oder Porenluft oben angeschlossen wird, während bei vollgesättigtem Versuch dieses

Ventil hauptsächlich zu Entlüften dient. Sowohl bei vollgesättigtem als auch teilgesättigtem D Versuch wird das Ventil für Zelldruck Innen mit der Leitung der VPC Anlage, das Ventil für Porenwasser unten mit der Leitung aus der Volumenmessenrichtung und das Ventil für Zelldruck Außen mit der Leitung aus dem Medienwandler verbunden.

## **6.6 Probleme beim Einbau der Bodenprobe und mögliche Gegenmaßnahmen**

Trotz sorgfältiger Bearbeitung der Bodenprobe kann es zu gewissen Abweichungen zwischen Ist- und Sollzustand kommen. Es ist schwierig, den Wassergehalt des Bodens beim Einbau der Probe mit dem mathematisch berechneten Wassergehalt ident zu halten. Denn die Wasserzufuhr geschieht bei der Bodenvorbereitung vor dem Bodenverdichten, es dauert jedoch eine Weile, bis der Vorgang des Verdichtens abgeschlossen ist und die verdichtete Probe in der Zelle eingebaut werden kann. Durch die Verdunstung verliert die Bodenprobe an Wassergehalt, dieser Anteil kann jedoch vernachlässigt werden. Größere Bedeutung hat jener Verlust an Wasser, der durch Verdichten der Bodenmasse verursacht wird.

Obwohl man bemüht sein wird, auf jede zu verdichtende Schicht die gleiche Verdichtungsenergie aufzubringen, kann nur schwer eine absolut homogen verdichtete Bodenprobe erzeugt werden. Einerseits wird der oben liegende Teil einer Bodenschicht mehr Verdichtungsenergie erhalten als der eher unten liegende Teil dieser Schicht, andererseits wird die zuunterst liegende Bodenschicht mitverdichtet, wenn darauf weitere Bodenschichten verdichtet werden. Da die Bodenprobe aus 8 Schichten besteht, wird die unterste Bodenschicht 8 Mal verdichtet, während die oberste Schicht nur 1 Mal verdichtet wird, dies führt unvermeidlich zu einer inhomogenen Verdichtung.

Es ist einige Male passiert, dass Schwierigkeiten bei Lösen des verdichteten Bodens aus dem zylindrischen Behälters auftraten. Bei Klopfen des seitlichen Flanschs am Behälter löst sich die Schale manchmal mit Teilen der verdichteten Bodenprobe ab, sodass diese Probe zu verwerfen ist. Eine mögliche Ursache dafür ist, dass die

Innenwand des zylindrischen Behälters nicht gut genug gereinigt war. Das bewirkt, dass die Oberfläche der Innenwand teilweise rau ist und der zu verdichtende Boden zu fest an der Innenwand anhaftet. Um das Problem zu lösen, wird die Innenwand des zylindrischen Behälters leicht mit Öl beschmiert. Es genügt allerdings ein Hauch von Beölung, und daher reicht es, die Ölschicht mit Papier aufzutragen.

Einen wasserdichten Versuchszustand herzustellen ist eine der wichtigsten Aufgaben in der Vorbereitungsphase. Neben den Dichtungsringen spielt die Gummi-Membran eine entscheidende Rolle. Die Randbereiche der Membran gehören zu den Risikozonen, wo am ehesten Schwachstellen auftreten, da sie sich beim Überstülpen am Spannzylinder am stärksten unter Spannung befinden. Mittels Sichtkontrolle wird die Tüchtigkeit der Gummi-Membran überprüft. Wenn man visuell keine Fehlstelle findet, muss es nicht heißen, dass sie funktionsfähig ist, denn oft kann man mittels einer Sichtkontrolle schwer die kleinen Fehlstellen entdecken. Eine undichte Membran lässt sich am Druckabfall in der Zelle erkennen. Es ist daher zu empfehlen, nach einigen Versuchsreihen eine neue Gummi-Membran zu verwenden.

Beim Aufsetzen des Druckstempels soll überprüft werden, ob er dabei mittig ins Loch der Kopfplatte fällt. Dadurch kann ein Hinweis gewonnen werden, ob die verdichtete Bodenprobe etwa schief geformt ist. Die Voraussetzung für eine horizontale aufgestellte Bodenprobe ist, dass der Druckstempel eben aufgebracht wird. Das bedeutet, dass die Platte mit dem Druckstempel samt Deckel der Innenzelle gleichmäßig dicht auf den Dichtungsringen der drei Stativstangen aufsitzt. Im schlimmsten Fall ist der Deckel verkantet und beschädigt Stativstangen. Es soll immer wieder überprüft werden, ob sich die Stativstangen aus der Bodenplatte lockern.

Trotz des entlüfteten Wassers sammelten sich im Zuge der Befüllung der Innen- und Außenzelle leicht Luftblasen im Bereich des Druckstempels. Daher soll am Ende der Befüllung der Innenzelle und Außenzelle das Entlüftungsventil an alle Belüftungsventile angesteckt werden. Um die Luftblasen gründlicher aus der Prüfzelle zu entfernen, kann die Prüfzelle leicht gekloppt und so gekippt werden, dass die Luftblasen sich am höchsten Punkt der Zelle befinden, zu einem der drei Feinregulierventile bewegen und von dort die Zelle verlassen können. Weiteres hilft

es, eine kleine Menge Wasser aus der vollgefüllten Zelle abzulassen und sie nochmals zu befüllen. Ein luftfreier Zustand in der Innenzelle ist von großer Bedeutung für die Messung der Volumen.

Laut Schöfer (2012) ist das Hochfahren der Presse nicht unbedingt notwendig, da beim Starten des Versuchs der Vorgang automatisch von der Software eingeleitet wird. Denn selbst wenn die Presse manuell bedient wird und der vermeintliche Kontakt erreicht wird, wird sie bei Starten des Versuchs nochmals kurz hochgefahren und erst dann gehalten. Dies impliziert, dass der leichte Kontakt, der erforderlich ist, schließlich von der Presse verifiziert wird. Die Presse wird halten, sobald ein bestimmter Kraftanschluss da ist. Der Kontaktpunkt, bei dem sich die Presse automatisch eingestellt, wird erreicht, wenn ein bestimmter Widerstand durch den Prüfkörper verursacht wird. Es kam jedoch einige Male vor, dass der Kontaktpunkt von der Presse nicht erkannt wurde, und die Presse weiter fuhr, obwohl bereits ein Kontakt hergestellt wurde. Dies sorgte für große Probleme, denn die gebaute Bodenprobe wurde von der Presse zusammengepresst und somit verformt, bevor der Versuch überhaupt angefangen hatte. Unter diesem Umstand wurde die Probe verworfen, und die ganze Vorbereitung musste von Anfang an wiederholt werden. Es bleibt immer noch ein Rätsel, was die Ursache für das Fehlverhalten war.

Die Verbindung zwischen der Prüfzelle und den Geräten soll immer wieder geprüft werden. Sämtliche Ventile auf der Bodenplatte der Triaxialprüfzelle werden eines nach dem anderen mit dem Auslassschlauch der Entgasungsanlage angeschlossen. Nun strömt Wasser aus der Entgasungsanlage in das entsprechende Ventil hinein, und jedes einzelne Ventil wird nacheinander eingeschaltet. Wenn beobachtet werden kann, dass an der entsprechenden Austrittsstelle auf der Bodenplatte Wasser austritt, kann angenommen werden, dass die Verbindungen problemlos funktionieren.

Es empfiehlt sich, Medienwandler und Bürette nach längerer Nichtbenutzung mit frischem Wasser zu füllen. Unter der Wirkung der Sonne entstehen leicht Mikroorganismen an der Gummioberfläche, daher soll sie ebenfalls gründlich gereinigt werden.

Obwohl das entlüftete Wasser in der VPC Anlage nicht der Gefahr des Ansiedelns von Algen ausgesetzt ist, wird vom Leiter des Geotechniklabors der Universität BOKU empfohlen, die VPC Anlage nach jedem Versuch komplett neu zu befüllen. Dies soll gewährleisten, dass die Leistungsfähigkeit der Anlage immer optimal bleibt.

## 6.7 Durchführung des Triaxialversuchs

Nachdem alle erforderlichen Verbindungen hergestellt sind, bedient man den Software „Geosys“, um den Versuch zu starten. Für die teilgesättigten und vollgesättigten Versuche werden entsprechende Prüfvorschriften herangezogen; am PC der Anlage sind Prüfvorschriften für unterschiedliche Versuchsarten programmiert und gespeichert, falls aber keine geeignete Prüfvorschrift vorhanden ist, muss eine erstellt werden.

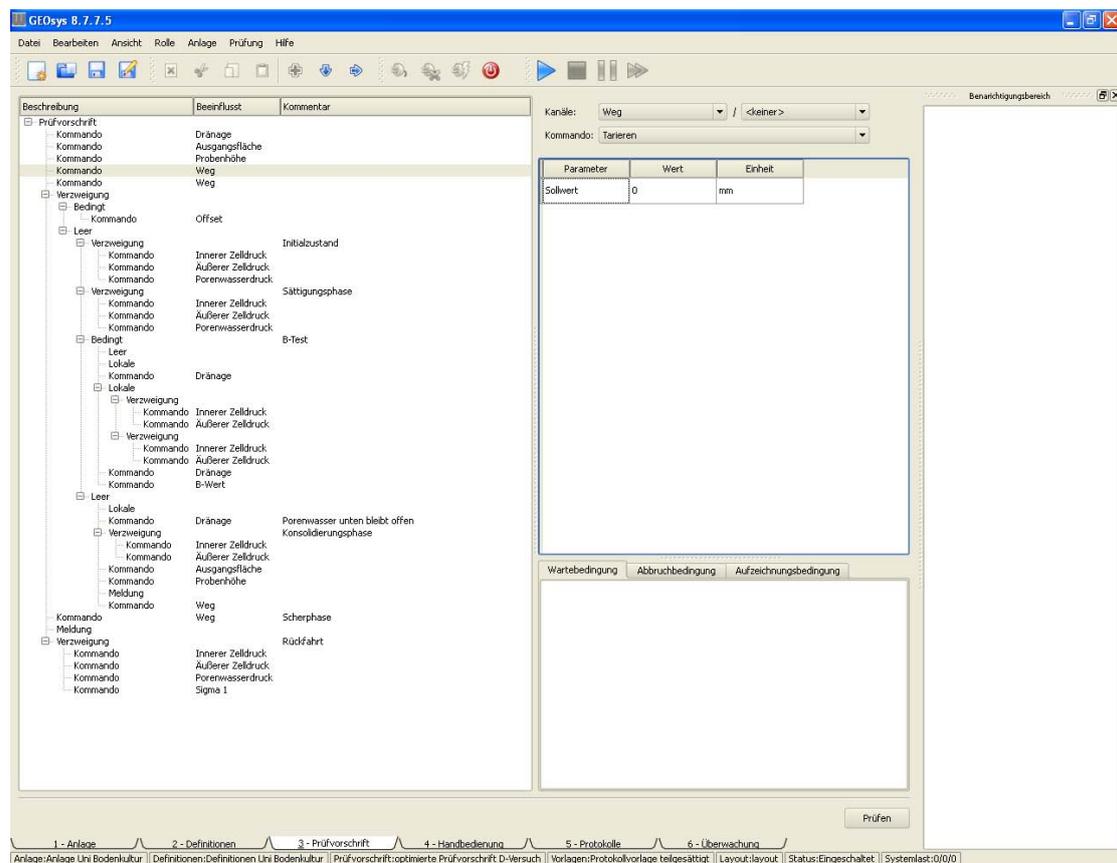


Abbildung 28: eine Prüfvorschrift für gesättigten Triaxialversuch

Nach dem Anklicken des Buttons „Stecker“ dauert es kurz bis die einzelnen Kanäle mit den aktuellen Messwerten und die Soll-Werte der jeweiligen Parameter erscheinen. Die aktuellen Messwerte sollen aber gleich null sein, wenn die Geräte im Ruhezustand sind. Kurz darauf ist der Button „Stecker mit Blitz“ aktiv, nach Bestätigung dieses Buttons werden die Parameter des Versuchskörpers sowie die Versuchseinstellungen wie unter anderem der Konsolidationsdruck und die Scherrate (Abbildung 26). eingegeben. Die Größe des Porenwasserdrucks, wie in der Grafik gezeigt wird, wird in allen teilgesättigten Versuchen gegen null gehalten, während der Luftdruck hier 50 kPa beträgt. Die Saugspannung weist mittels der bereits genannten „Axis-Translation-Technique“ einen Wert von 50 kPa auf, was ebenfalls ein Zeichen der teilgesättigten Versuche ist.

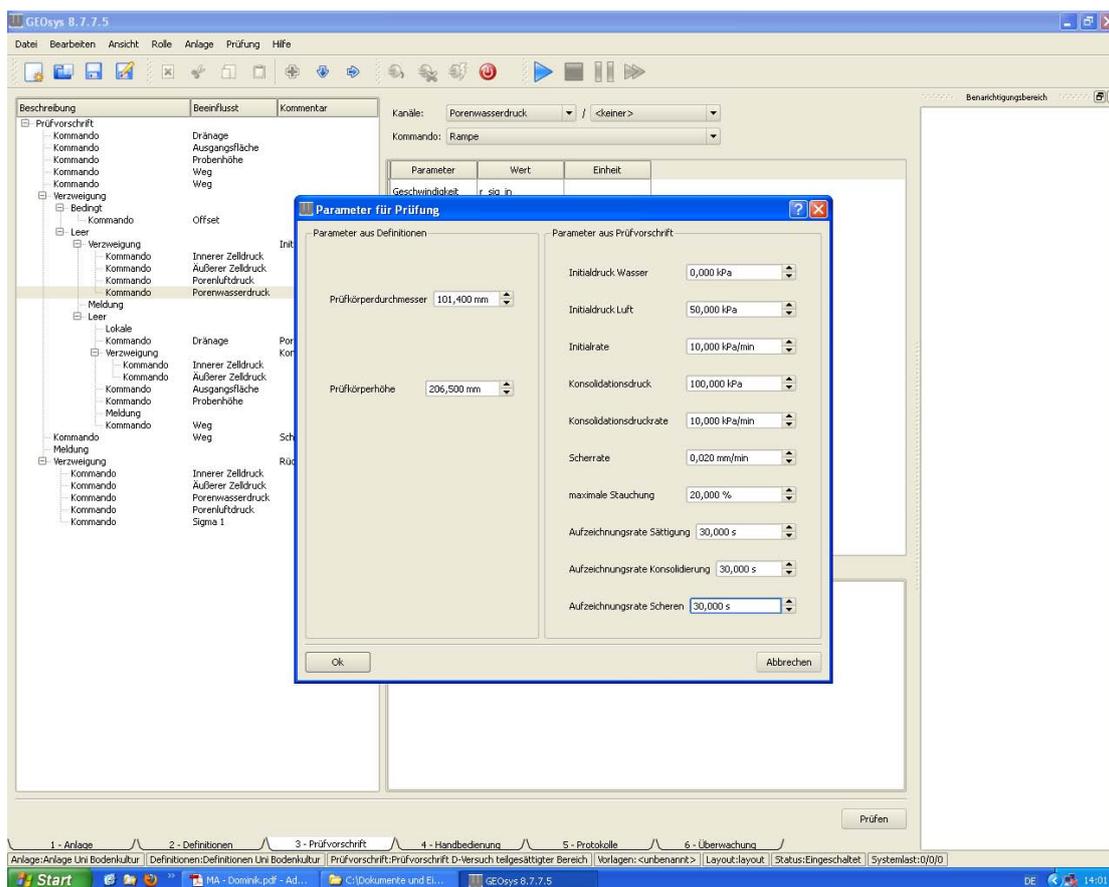


Abbildung 29: Abfrageprotokoll für einen teilgesättigten Versuch

Wie die Abbildung zeigt, ergibt sich der effektive Seitendruck aus der Differenz von dem Konsolidationsdruck  $\sigma_3$  und der Saugspannung ( $u_a - u_w$ ). Für den Versuch, dessen Versuchparameter in Abbildung 26 dargestellt werden, kann der effektive Seitendruck aus dem eingegebenen Konsolidationsdruck 100 kPa minus der Saugspannung (50 kPa) ermittelt werden. Die Frequenz der Aufzeichnungsrate kann erfahrungsgemäß auf 30 s eingestellt werden. Nachdem alle Felder aufgefüllt wurden, wird die Datei gespeichert. Der Versuch kann durch Bestätigen des Buttons „OK“ gestartet werden, allerdings muss die Frequenz der Aufzeichnung im Kartenreiter „Protokoll“ nochmals eingestellt werden. Danach startet der Versuch durch Bestätigen des Buttons „Start“. Diagramme dienen dazu, Versuchsabläufe zu überwachen und sie weisen auf mögliche Probleme hin. Nach Dominik Schöfer haben sich folgende Diagrammzusammenstellungen bewährt:

	x-Achse	y-Achse
Diagramm 1	Zeit [t]	innerer Zelldruck [kPa]
	Zeit [t]	äußerer Zelldruck [kPa]
	Zeit [t]	Porenwasserdruck [kPa]
	Zeit [t]	Porendrucksensor [kPa]
Diagramm 2	Zeit [t]	Weg [mm]
	Zeit [t]	vertikale Verformung [%]
Diagramm 3	Zeit [t]	KMD [N]
	Zeit [t]	vertikale Kraft [N]
Diagramm 4	Zeit [t]	Porenvolumen [ml]
Diagramm 5	vertikale Verformung [%]	Sigma 1 [kPa]
	vertikale Verformung [%]	Sigma 1 (ohne Flächenkorrektur) [kPa]

Abbildung 30: empfohlene Diagrammzusammenstellung, gesättigter Versuch

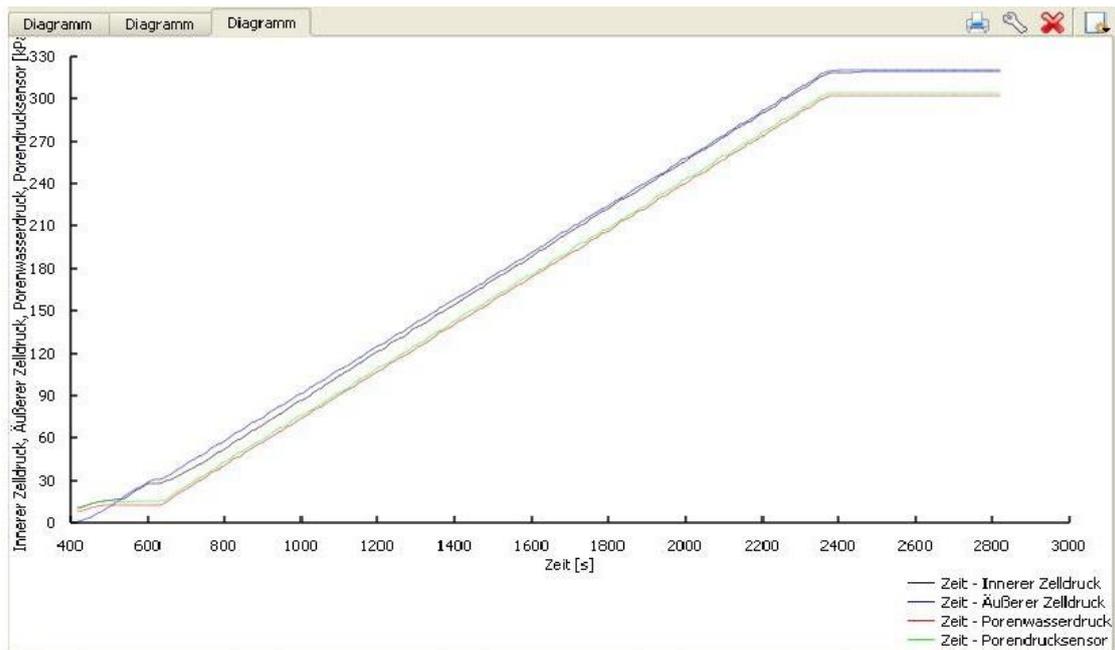


Abbildung 31: Darstellen eines Diagramms

Sowohl die teilgesättigten als auch die vollgesättigten Versuche verlaufen im Großen und Ganzen gleich. Das sind die Initialphase, die Konsolidationsphase und die Scherphase, bei den vollgesättigten Versuchen kommt zusätzlich noch die Sättigungsphase inklusive den B-Test dazu.

Die Initialrate aus dem Prüfprotokoll gibt an, wie schnell die Drücke ansteigen. Diese soll nicht zu groß gewählt werden, denn das Abbauen eines auffälligen Porenwasserüberdrucks braucht eine gewisse Zeit. Wenn der Versuch beginnt, kann eindeutig wahrgenommen werden, dass die VPC-Anlage den Initialdruck mit der eingestellten Steigung aufbringt. In der Initialphase eines ungesättigten Versuchs wird die Saugspannung als Differenz zwischen dem Porenluftdruck und Porenwasserdruck aufgebracht. Die Initialphase ist erreicht, wenn die Ist-Größe aller Kanäle ungefähr der Soll-Größe gleicht. Ist der Zielwert des Initialdrucks erreicht, die VPC-Anlage aber immer noch dauerhaft sehr aktiv, so weist dies darauf hin, dass die Gummi-Membran, die die Bodenprobe umhüllt, undicht ist, denn in einem undichten Medium kann kein Spannungsgleichgewicht dauerhaft ohne Zufuhr von externem Druck hergestellt werden. Das Erreichen der Soll-Größe bedeutet allerdings noch nicht, dass diese Phase abgeschlossen ist. Eine minimale Dauer der Initialphase wird mit 24 Stunden angesetzt,

bevor der Versuch in die nächste Stufe übergeht. Wenn diese Bedingung erreicht wird, fragt das Programm ab, um auf die nächste Phase überzugehen. Es kann aber nicht immer gewährleistet werden, dass der gewünschte Gleichgewichtszustand nach einem Tag mit Sicherheit erreicht wird. Daher soll darauf geachtet werden, dass die Änderung des Zellenvolumens relativ konstant bleibt. Es ist daher empfehlenswert, erst dann das Weiterfahren am PC zu bestätigen, wenn der gewünschte Zustand erreicht ist. Bei einem vollgesättigten Versuch weicht die Versuchsanordnung geringfügig von einem Teilgesättigten ab. Der wesentlichste Unterschied liegt darin, dass in einem vollgesättigten Versuch die freie Leitung an das Ventil „Porenwasser bzw. –luft oben“ angeschlossen wird, um zu entlüften. Auch die Lufteinschlüsse in gekreuzten Drainageschläuchen können durch die gleiche Methode minimiert werden. Wenn keine Luftbläschen mehr in den Drainageschläuchen zu beobachten sind und die Leitung tropft während der Aufbringung des Sättigungsdruckes bzw. in der nachfolgenden Sättigungsphase kontinuierlich, kann die Leitung geschlossen werden.

Es herrscht in der Innen- und Außenzelle stets gleich großer Druck. Es ist wichtig, dass die Drücke in der Bodenprobe immer kleiner als jene in den Zellen sind, denn dies gewährleistet, dass die Bodenprobe nicht zerstört wird. Der Druckunterschied liegt ungefähr bei 20 kPa. Es muss noch darauf geachtet werden, dass der Druck in der Außenzelle rechtzeitig ansteigt. Oft kommt es vor, dass der Druck in der Außenzelle, der durch die APC erzeugt wird, hängen bleibt. Tritt dieser Fall ein, kann das Problem durch manuelle Änderung der Anstiegsrate des Drucks behoben werden.

Wenn die Initialphase abgeschlossen ist, das heißt, wenn die Einleitung der Sättigungsphase per Maus-Klick bestätigt wird, steigen die Drücke weiter an, bis sie die vorgeschriebenen Werte erreichen. Üblicherweise wird der vorgeschriebene Sättigungsdruck so festgelegt: Der innere- und der äußere Zelldruck liegen bei 320 kPa, der Porenwasserdruck bei 300 kPa. Die Differenz zwischen den beiden Drücken beträgt 20 kPa und wird als Offset bezeichnet. Zur Kontrolle der Bodensättigung vollgesättigter Proben wird ein „B-Test“ durchgeführt (siehe Terminologie). Der B-Test ist durch den minimal akzeptablen B-Wert charakterisiert, der bereits vor dem Versuchsbeginn zu bestimmen ist, und in der vorliegenden Arbeit bei 60 % liegt. Die Sättigungsdauer spielt ebenfalls eine Rolle. Wenn sie zu kurz eingestellt wird, kann der B-Wert erst nach

mehreren Zyklen erreicht werden, was wiederum mehr Aufwand verursacht. In dem vorliegenden Fall trägt die Sättigungsdauer 20 Minuten. Der B-Test beginnt mit der Anfrage des Programms: Drainage schließen. Nun soll der Ventil „Porenwasser unten“ geschlossen werden, bevor die Meldung per Mausklick bestätigt wird. Dabei soll darauf geachtet werden, dass der Ventil ganz langsam geschlossen wird, um das herrschende Druckverhältnis so wenig wie möglich zu beeinflussen. Der innere- und der äußere Zeldruck steigen mit der Anstiegsrate an, sie werden bei 350 kPa für 5 Minuten konstant gehalten.

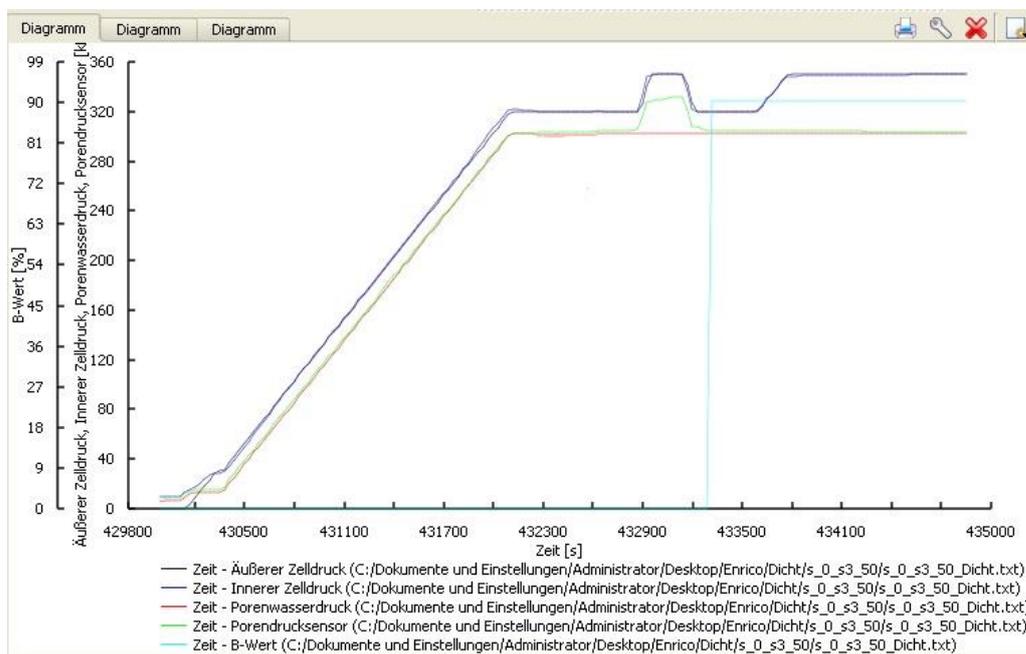


Abbildung 32: Darstellen eines vollständigen B-Tests

Danach fallen die Drücke auf den ursprünglichen Sättigungsdruck. Wenn der B-Wert unterhalb des festgelegten Wertes liegt, muss der ganze Prozess wiederholt werden. Dabei wird die Leitung Porenwasser unten wieder langsam aufgemacht, der Wert des Porendrucksensors steigt rasch an und erreicht bald den gleichen Stand wie jener des Porenwasserdrucks. Wenn der B-Test erfolgreich abgeschlossen ist, wird die Konsolidationsphase eingeleitet. Der innere- und äußere Zeldruck steigt weiter an, bis der erforderliche Druck erreicht ist. Der Porenwasserdruck wird nun konstant gehalten. Mindestens 24 Stunden nach Beendigung der Konsolidationsphase wird wie immer durch die Bestätigung der Meldung die Scherphase eingeleitet. Dabei werden zunächst

der Weg und die vertikale Verformung variiert und an die tatsächliche Probehöhe angepasst. Der Versuch kann unterschiedlich beendet werden. Ein Kriterium ist das Überschreiten der 20- prozentigen Probehöhe, was allerdings in der Praxis kaum erreicht werden kann. Der Versuch endet automatisch, wenn die vertikale Spannung nach dem Peak mit zunehmender Stauchung konstant bleibt. Am Ende eines Versuchs müssen die Drücke in allen Kanälen noch manuell mit einer Rampe bis zum Stillstand herunter gefahren werden. Im Falle einer außerplanmäßigen Unterbrechung geschieht dies manuell. Danach soll die ganze Gerätschaft ebenfalls zum Ursprungszustand gebracht werden: Die Innen- und die Außenzelle müssen wieder entleert werden. Die VPC- Anlage soll wieder zurück in die Anfangsposition gefahren werden, es ist optional möglich, sie ebenfalls zu entleeren. Ist die Zelle leer, wird die Presse wieder herunter gefahren und die gesamte Prüfzelle auf einen Tisch gebracht und dort geöffnet. Der letzte Schritt eines Triaxialversuchs ist es, die Gerätschaft sauber und funktionstüchtig zu erhalten. Vor allem die Verschmutzung durch den Prüfkörper in der Prüfzelle muss gänzlich entfernt werden. Die Keramikplatten bei teilgesättigten Versuchen müssen nach Reinigung in ein Wasserbad gestellt werden. Die Gummi-Membran wird gereinigt und trocken gelagert. Vom oberen und unteren Ende der gebrauchten Bodenprobe werden Proben entnommen, um den Wassergehalt festzulegen. Die restliche Bodenmasse wird gesammelt und steht für die weiteren Versuche zur Verfügung.



Abbildung 33: Prüfkörper am Ende eines Versuchs

## 7. Auswertung der Versuchsergebnisse

Insgesamt werden die Ergebnisse der 18 Versuche zum Auswerten herangezogen. Diese Versuche können nach der Verdichtung des Bodens in „locker“ oder „dicht“ unterteilt werden. Innerhalb der unterteilten Versuchsreihen unterliegen die Versuche gleichen Rahmenbedingungen. Es werden insgesamt drei Stufen von Seitendrücken angewendet (50, 100 und 200 kPa), und für jede dieser Stufen werden drei Versuche mit unterschiedlichen Luftdrücken (0, 50 und 100 kPa) gemacht. Es werden folgende Grafiken für die Auswertung der Versuche benötigt: Das Spannungs- und Dehnungsdiagramm, die Mohr'schen Spannungskreise mit Bruchgeraden, das  $p'$ - $q$  und  $p_{\text{net}}$ - $q$  Diagramm. Durch das Spannungs- und Dehnungsdiagramm kann das Verhalten des Prüfkörpers in Hinsicht auf die zunehmende Spannung und Stauchung

veranschaulicht werden. Bei den dichten Böden kommt es infolge des Anstiegs der Drücke zu einer Kompression, bis die maximale Scherfestigkeit erreicht wird. Die Größe des Peaks ist charakteristisch für die dichten Versuche und mit ihr kann  $\sigma_1$  bestimmt werden. Bei den lockeren Böden wird kein Peak auftreten. Die Parameter in den p-q Diagrammen müssen definiert werden. Die deviatorische Spannung q ergibt sich aus der Differenz von  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ . Es wird zwischen  $P_{\text{net}}$  und  $P'$  unterschieden. P ist die gemittelte Spannung und kann durch  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  gewonnen werden, da die Seitenspannungen  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  gleich groß sind, kann P so berechnet werden:  $(\sigma_1 + 2 \times \sigma_3)/3$ .  $P_{\text{net}}$  erhält man durch  $P - u_a$ ,  $u_a$  ist der Porenluftdruck.  $P'$  ergibt sich aus  $(p - u_a) + Sr(u_a - u_w)$ , der Sättigungsgrad  $S_r$  kann einerseits dadurch gewonnen werden, dass jener des Prüfkörpers nach jedem Versuch bestimmt wird, es muss allerdings darauf geachtet werden, dass der so gewonnene Wassergehalt ungenau werden kann. Andererseits lässt sich der Sättigungsgrad durch die Informationen aus der Retentionskurve ermitteln.

Alle Versuche werden im folgenden Format dargestellt: X\_Y\_Z

X steht für die Luftdrücke (0, 50 oder 100 kPa), da die Porenwasserdrücke annähernd auf Null gehalten werden, gleicht die Größe der Luftdrücke ebenfalls der Größe der Saugspannung, Y steht für die Seitendrucke und sie ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Konsolidationsdruck und der Saugspannung (50, 100 oder 200 kPa), Z steht für den Lagerungszustand der Versuche und kann entweder dicht (D) oder locker (L) sein. Die Tabelle 6 gibt eine Übersicht aller ausgewerteten Versuche.

q in kPa	
0_200_D	375.27
0_100_D	200.29
0_50_D	83.24
0_200_L	333.24
0_100_L	129.96
0_50_L	41.52
50_200_D	521.79
50_100_D	365.9
50_50_D	262.62
50_200_L	404.63
50_100_L	248.89
50_50_L	144.07
100_200_D	525.78
100_100_D	362.41
100_50_D	228.21
100_200_L	429.69
100_100_L	195.2
100_50_L	132.05

Tabelle 3: Testübersicht

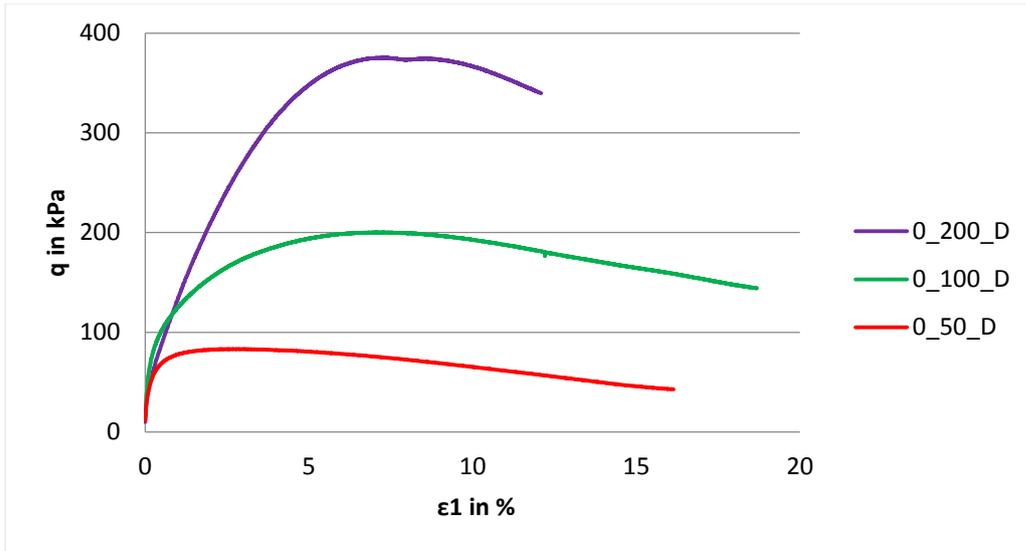


Abbildung 34: Spannungs-Verformung, gesättigter D-Versuch, dicht

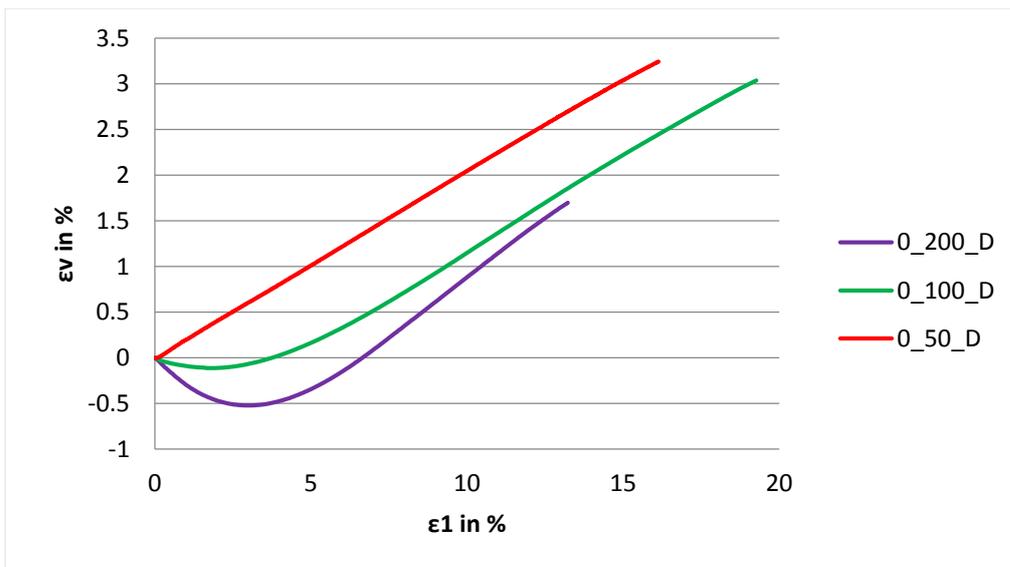


Abbildung 35: Volumendehnung, gesättigter D-Versuch, dicht

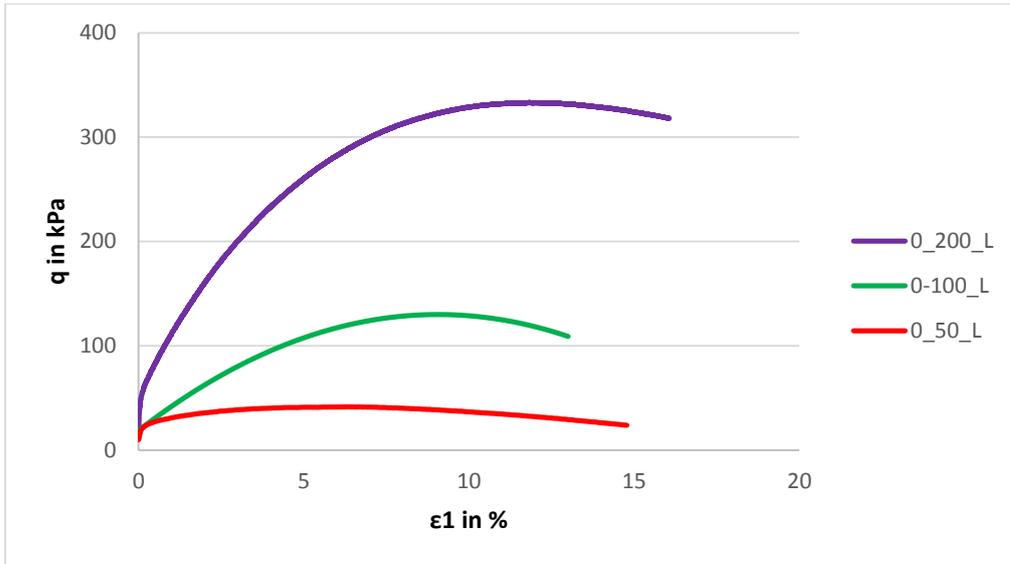


Abbildung 36: Spannungs-Verformung, gesättigter D-Versuch, locker

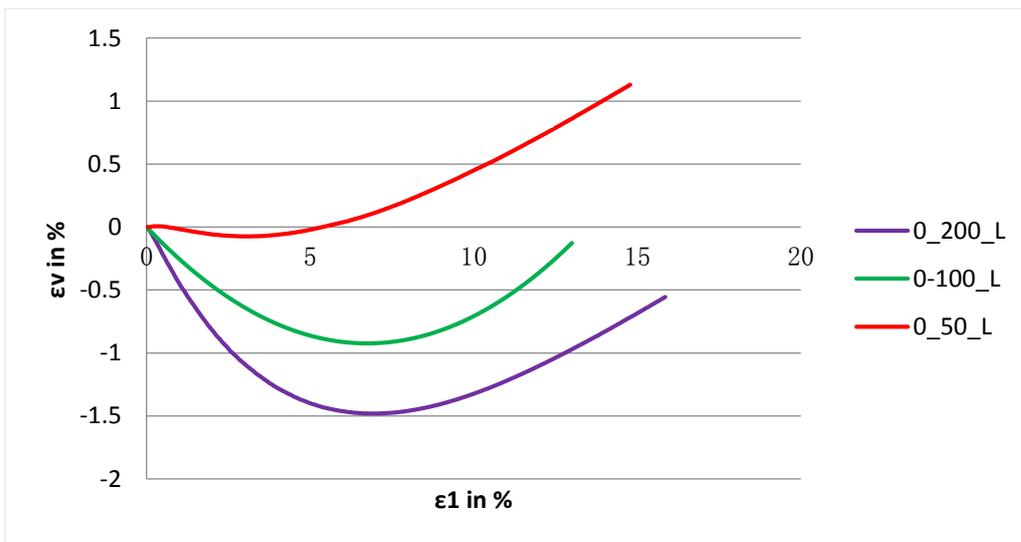


Abbildung 37: Volumendehnung, gesättigter D-Versuch, locker

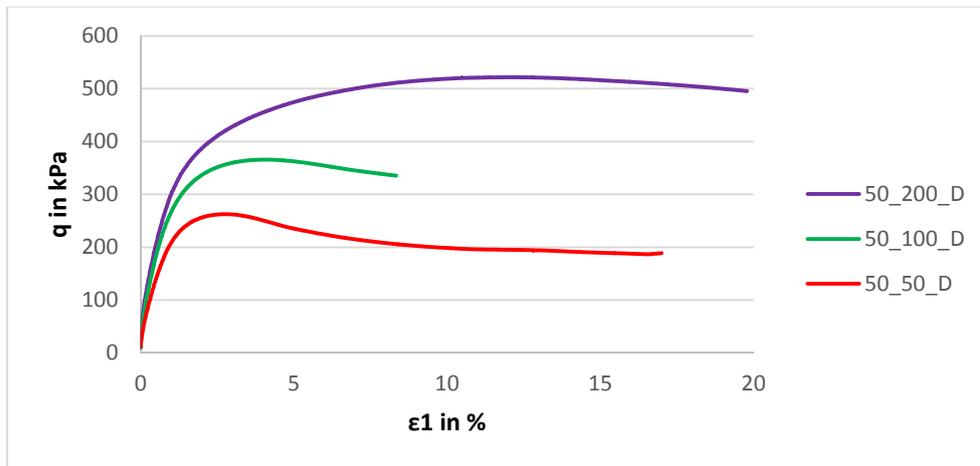


Abbildung 38: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung=50 kPa

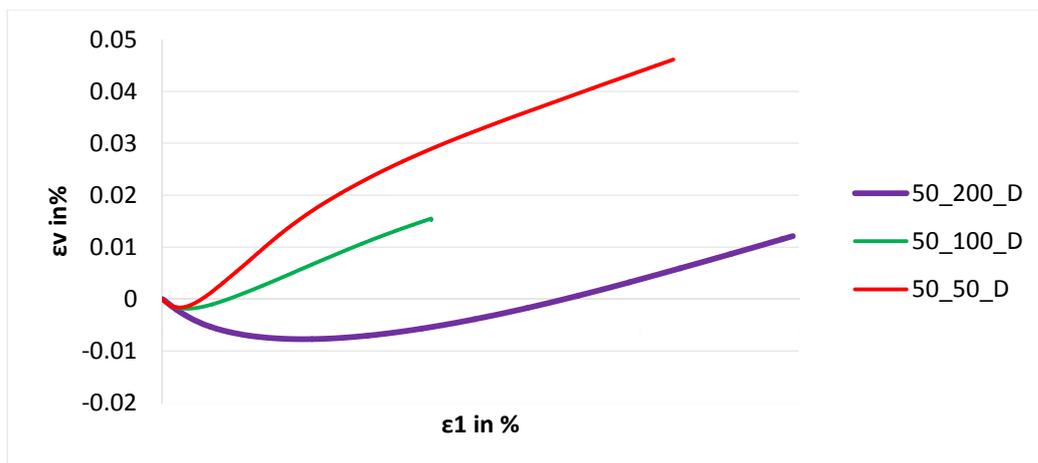


Abbildung 39: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 50 kPa

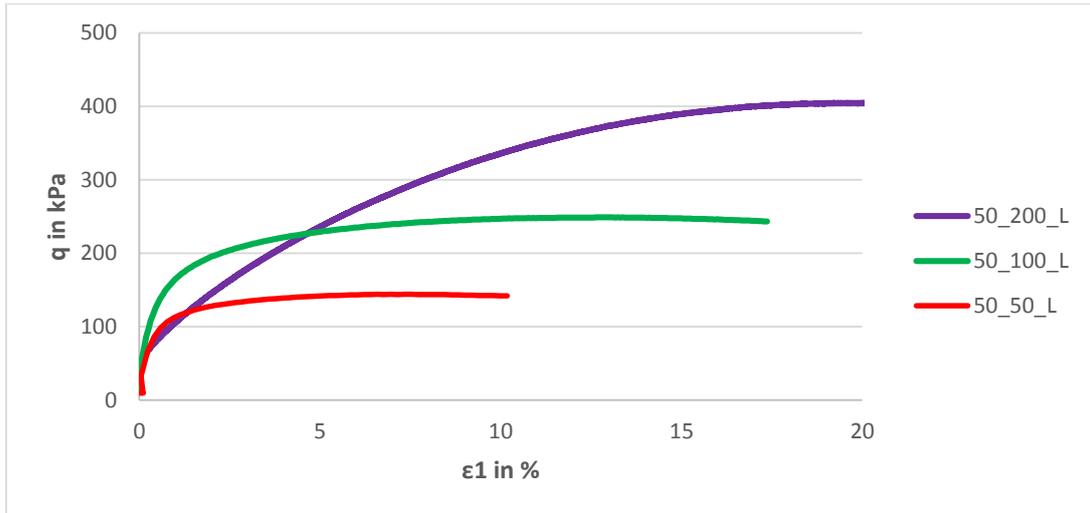


Abbildung 40: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa

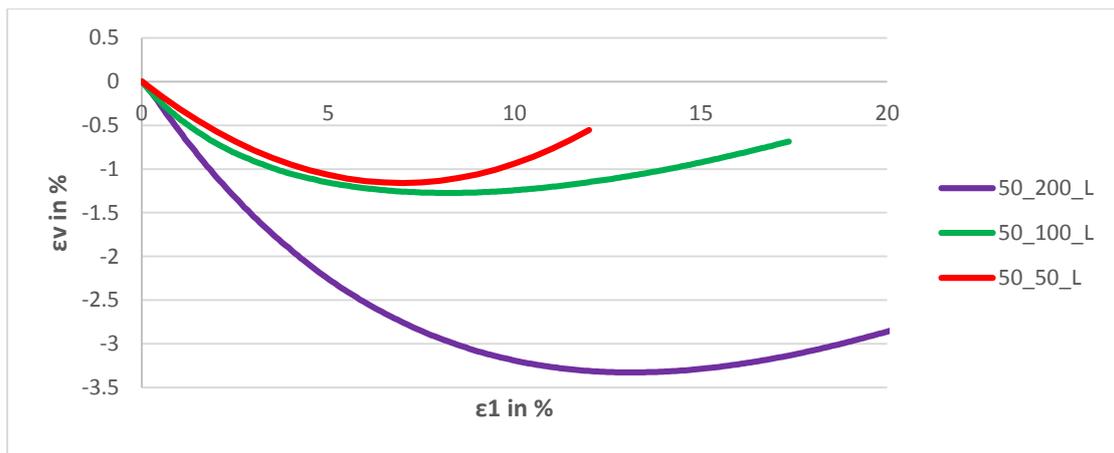


Abbildung 41: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa

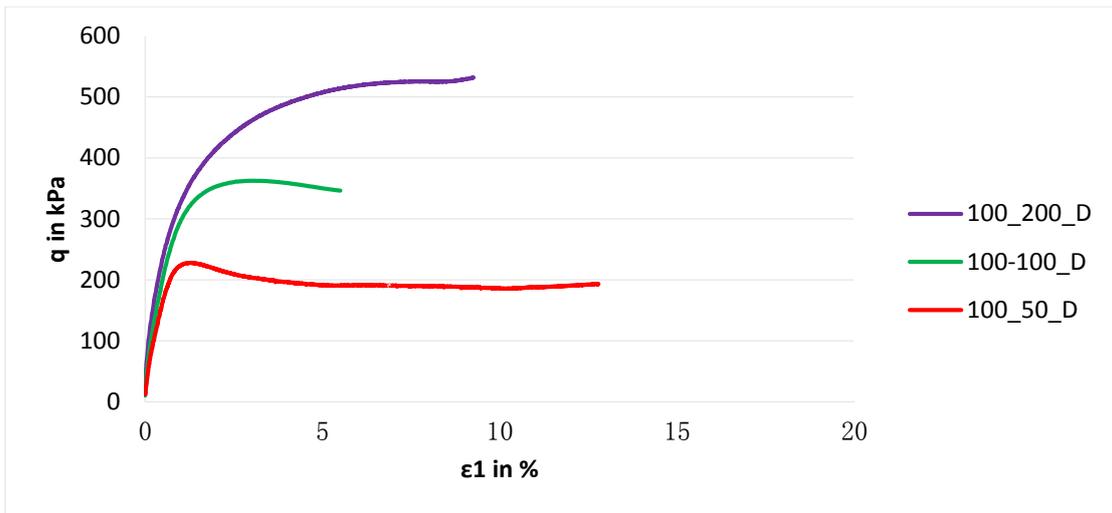


Abbildung 42: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa

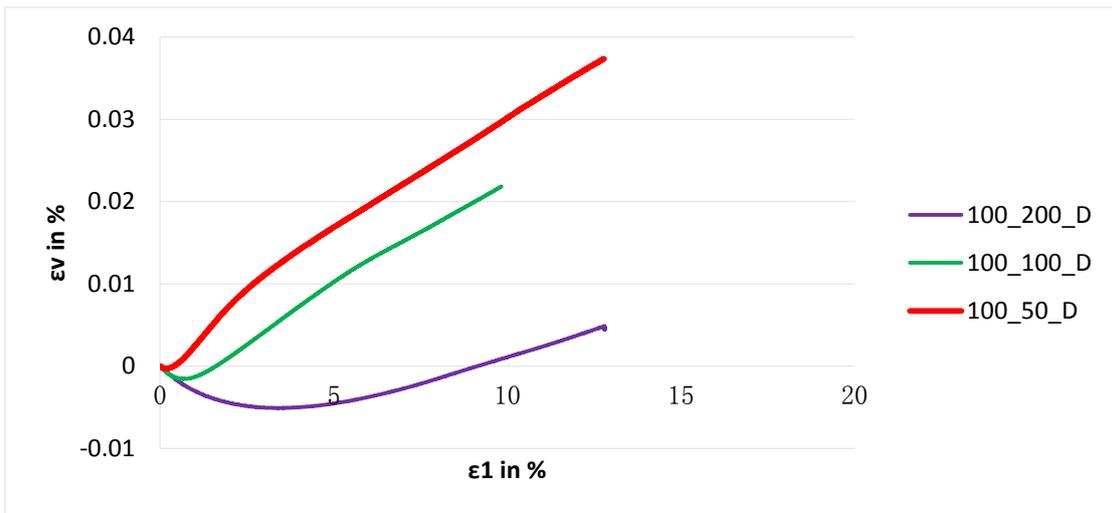


Abbildung 43: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa

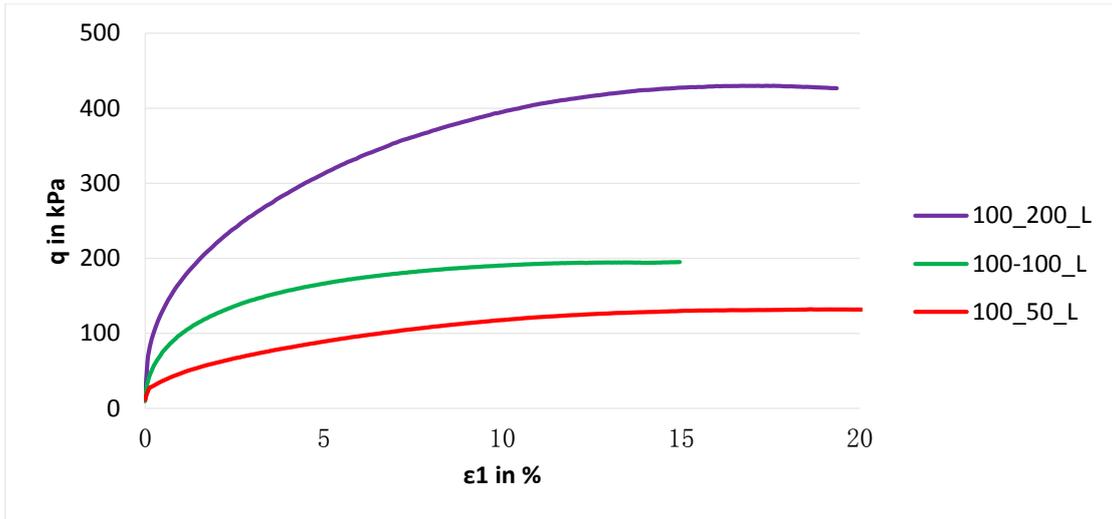


Abbildung 44: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa

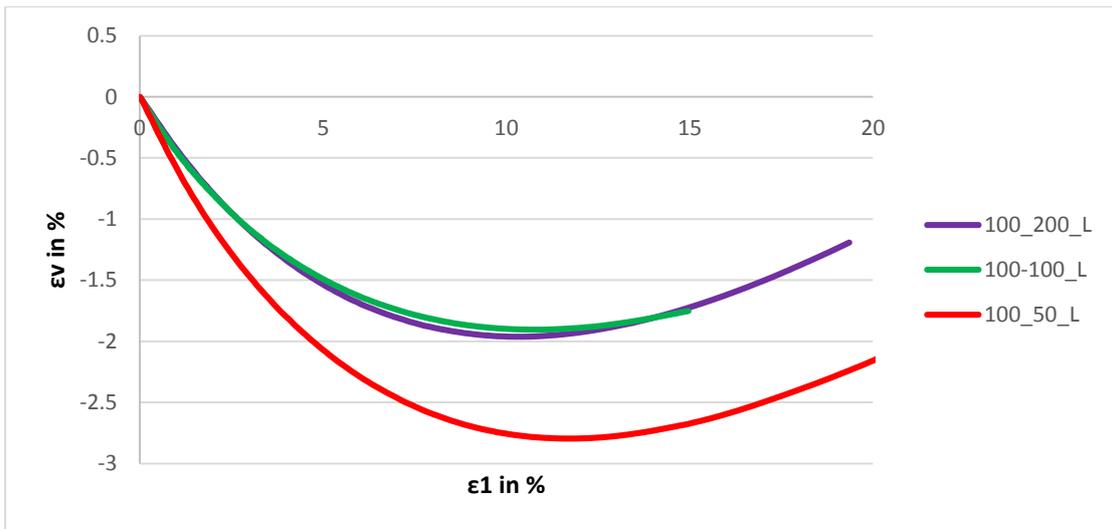


Abbildung 45: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa

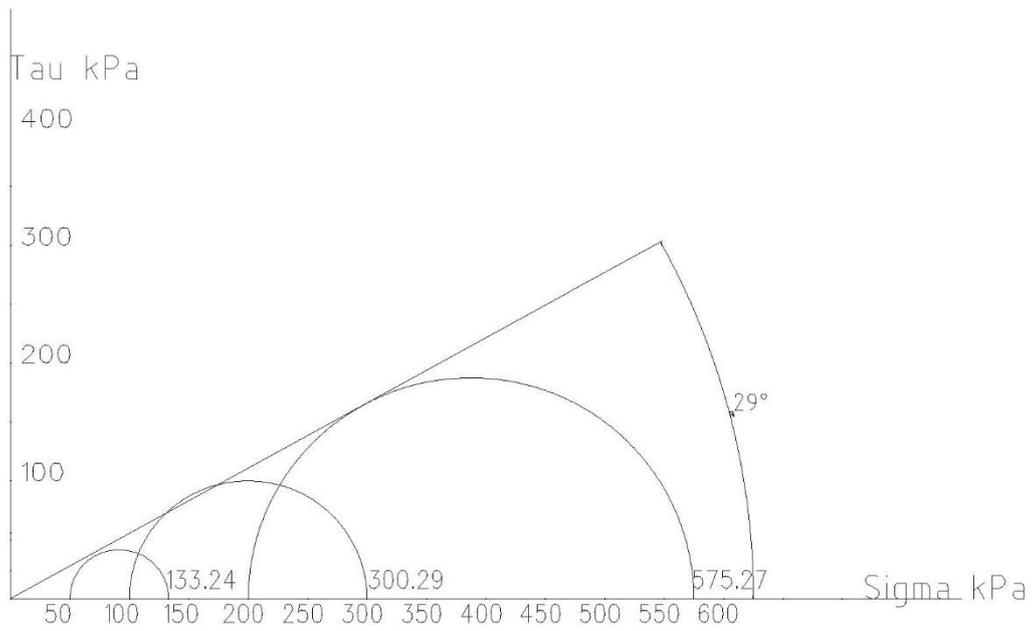


Abbildung 46: Mohr'scher Spannungskreis, gesättigter D-Versuch, dicht

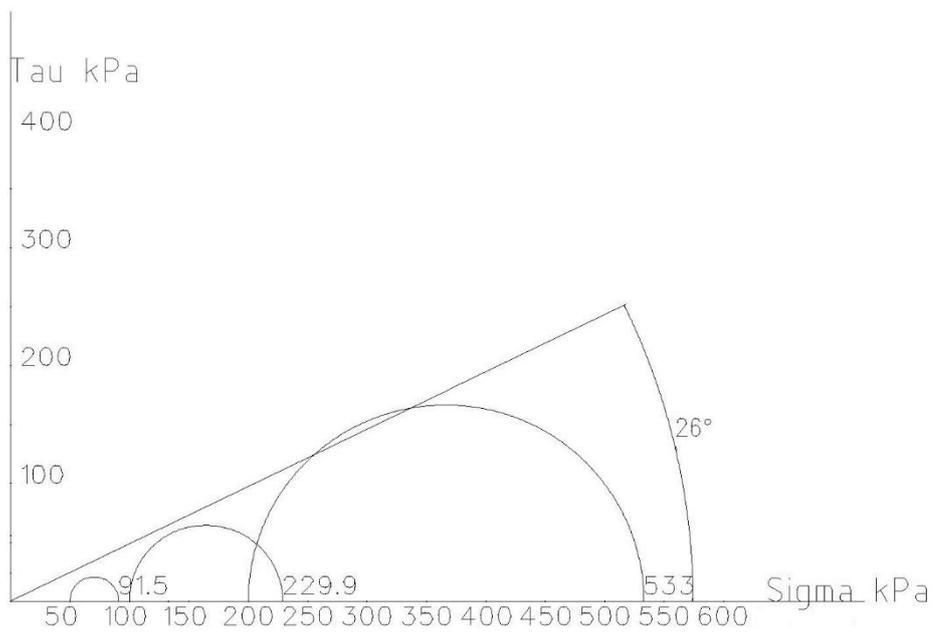


Abbildung 47: Mohr'scher Spannungskreis, gesättigter D-Versuch, locker

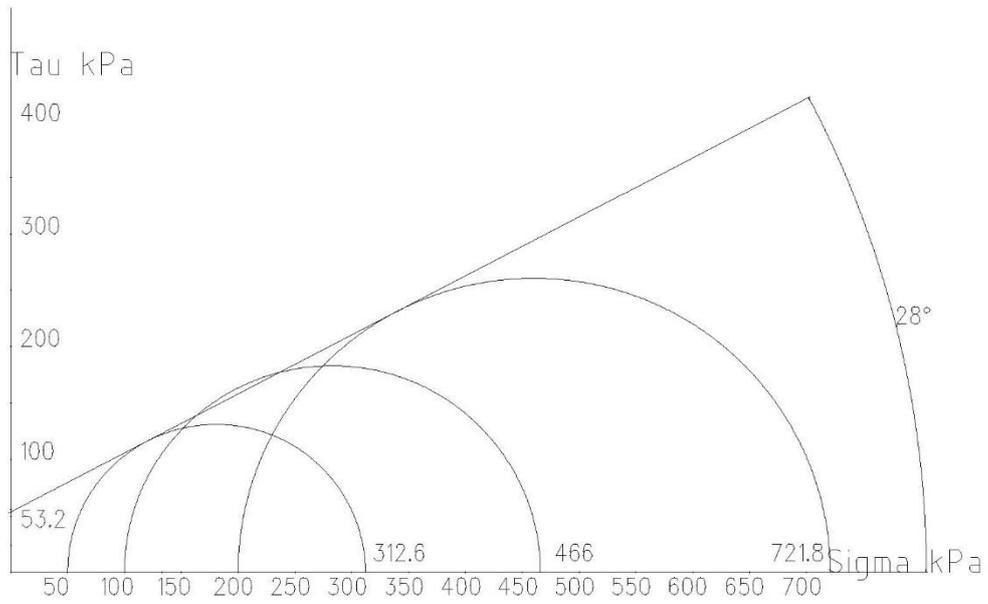


Abbildung 48: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 50 kPa

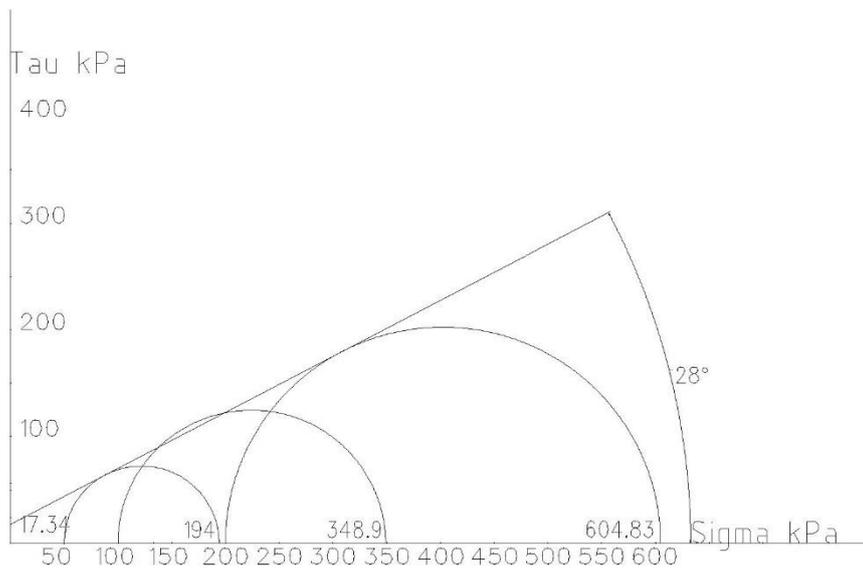


Abbildung 49: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa

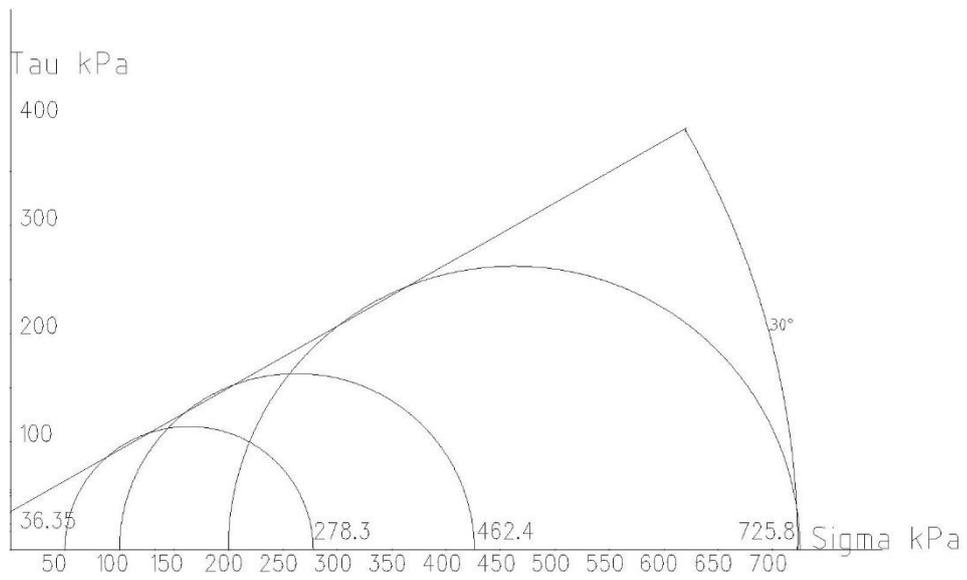


Abbildung 50: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa

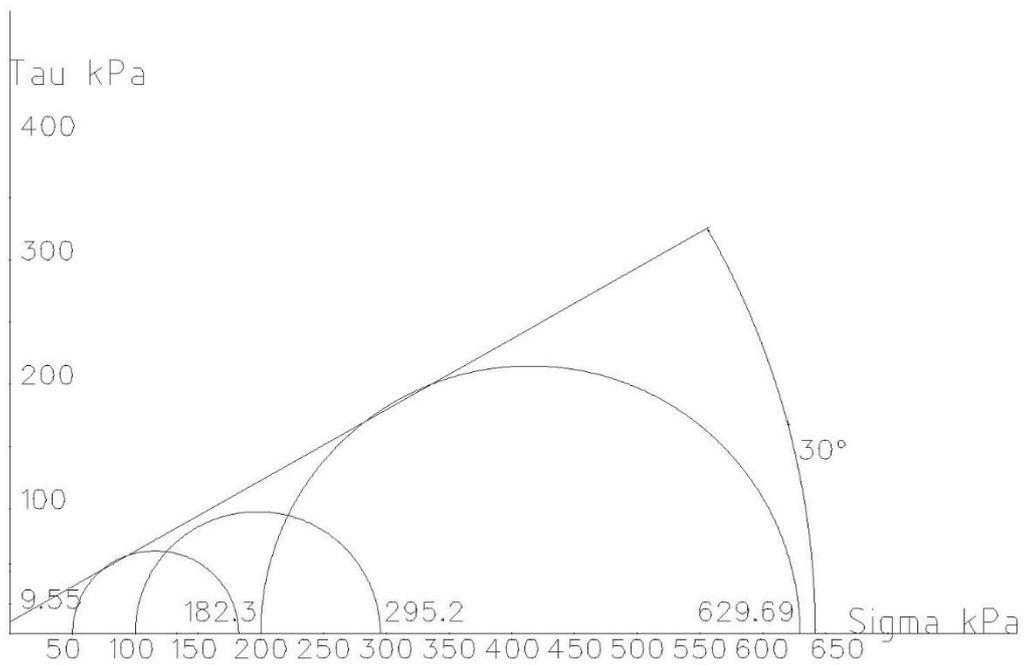


Abbildung 51: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa

Zusammengefasst können folgende Scherparameter gewonnen werden.

dicht	Kohäsion	Reibungswinkel
0-50 0-100 0-200	0	29°
50-50 50-100 50-200	52.2 kPa	28°
100-50 100-100 100-200	36.35 kPa	30°

Tabelle 4: Scherparameter der D-Versuche, mit dichtem Boden

locker	Kohäsion	Reibungswinkel
0-50 0-100 0-200	0	25°
50-50 50-100 50-200	17.34 kPa	28°
100-50 100-100 100-200	9.55 kPa	30°

Tabelle 5: Scherparameter der D-Versuche, mit lockerem Boden

Aus dem Mohr'schen Spannungskreis kann noch der Spannungsfaden gewonnen werden.

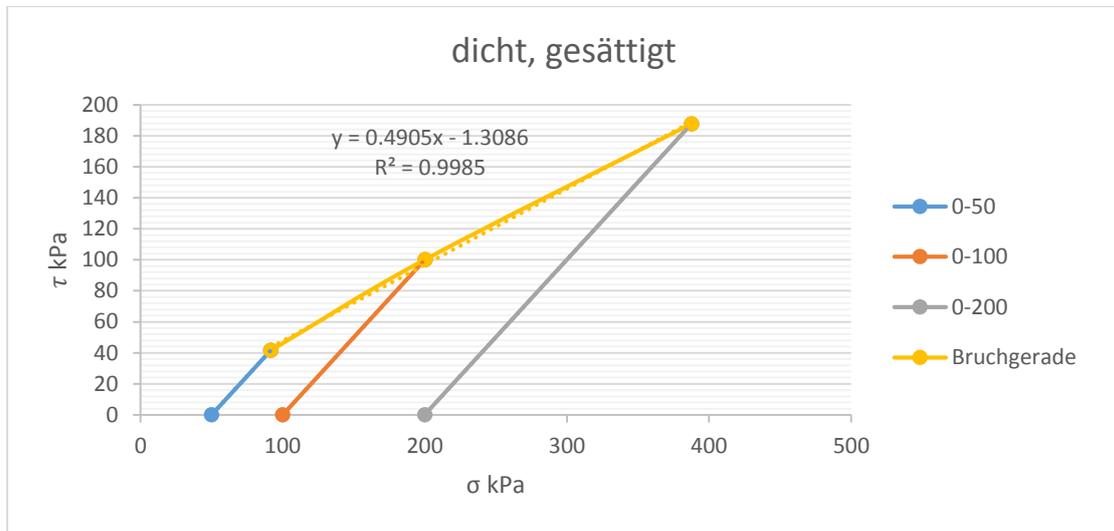


Abbildung 52: Spannungsfaden, gesättigter D-Versuch, dicht

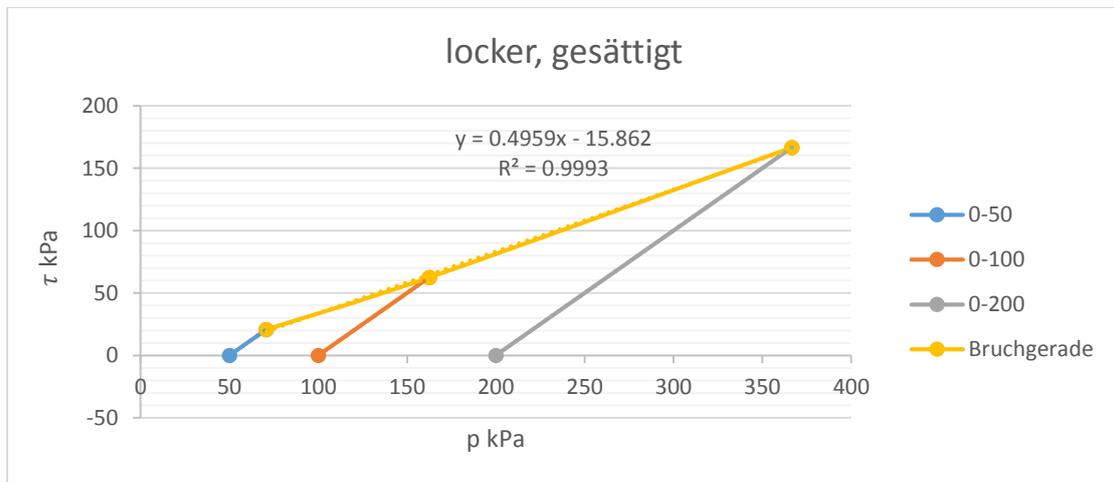


Abbildung 53: Spannungsfaden, gesättigter D-Versuch, locker

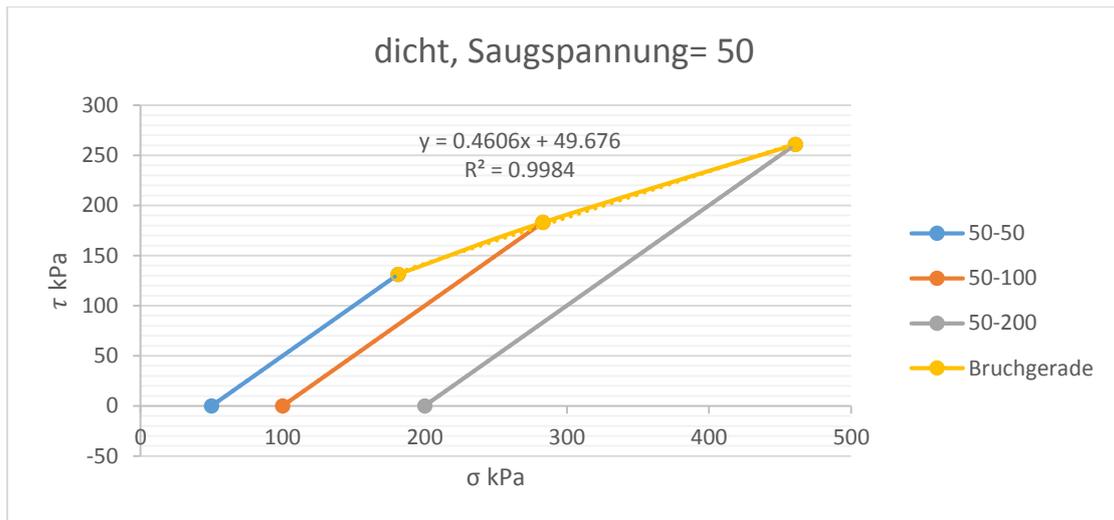


Abbildung 54: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 50 kPa

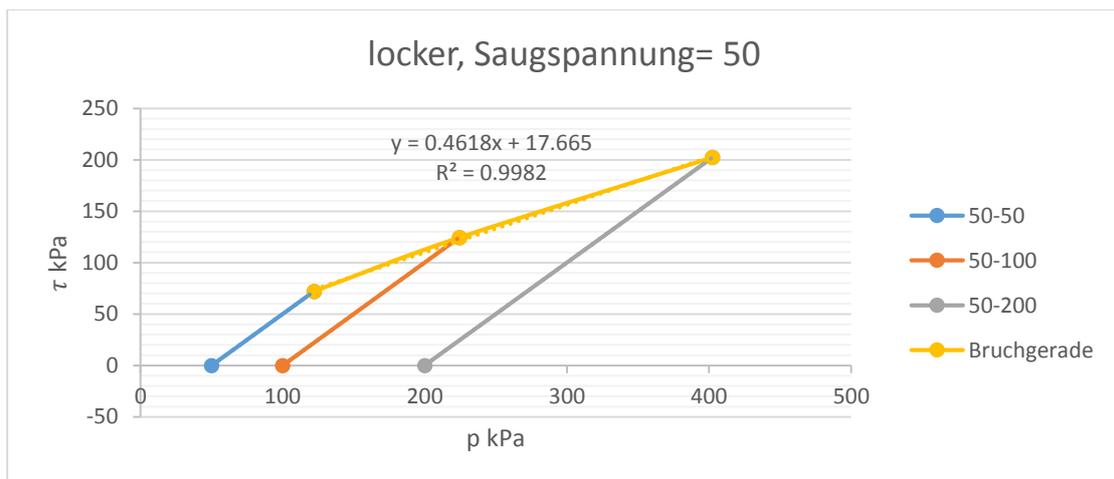


Abbildung 55: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa

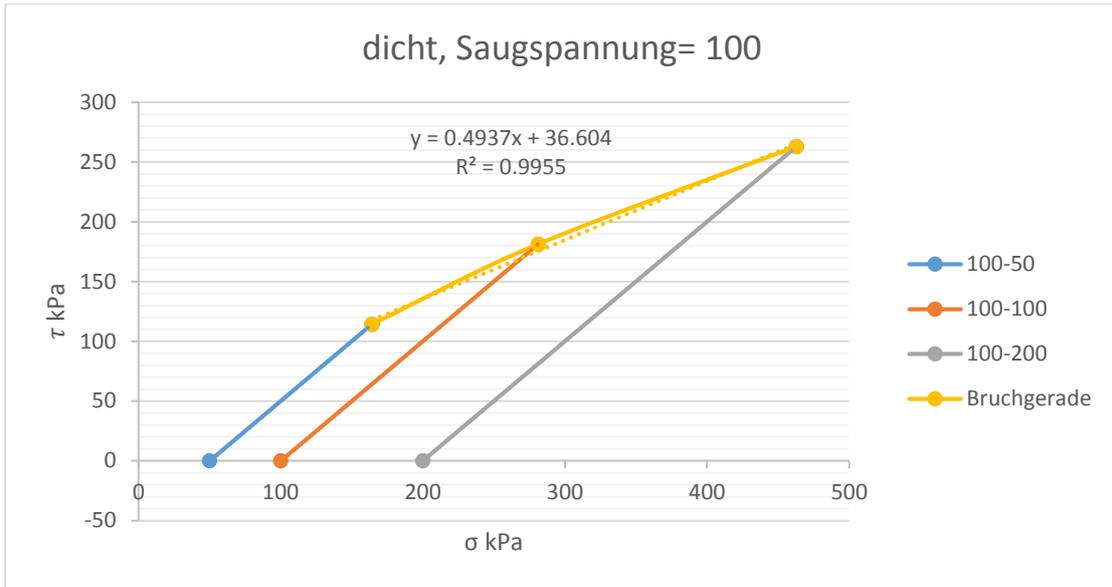


Abbildung 56: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa

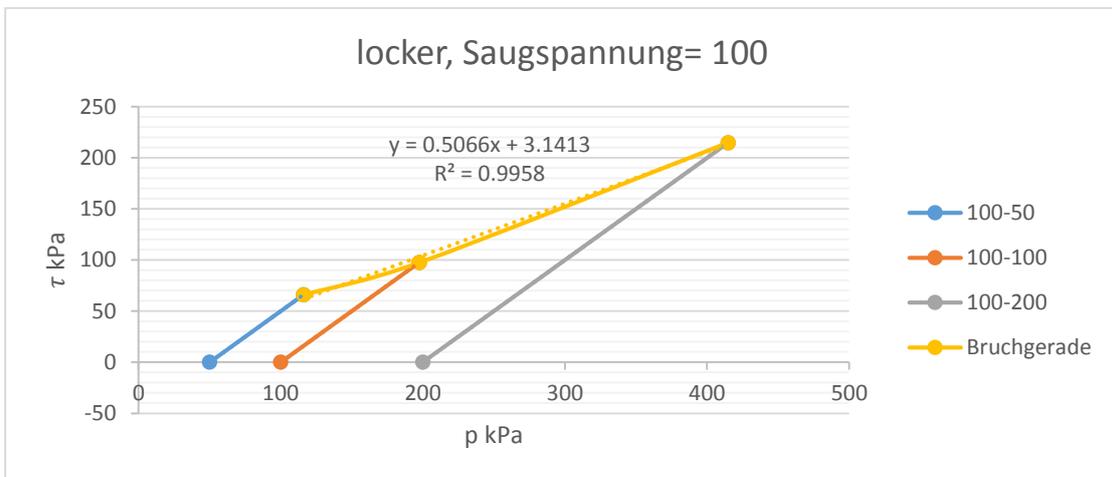


Abbildung 57: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa

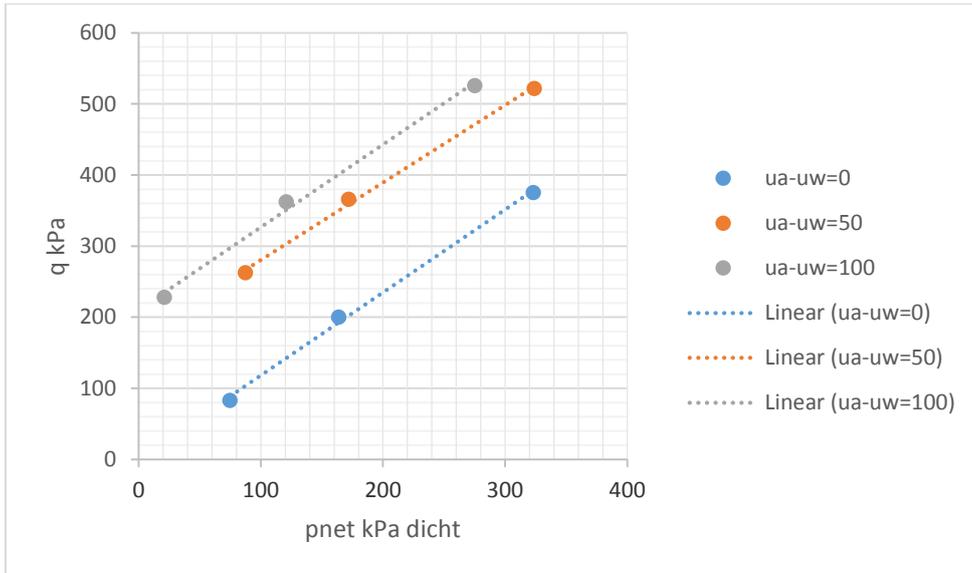


Abbildung 58: p<sub>net</sub>-q Diagramm, D-Versuche, mit dichtem Boden

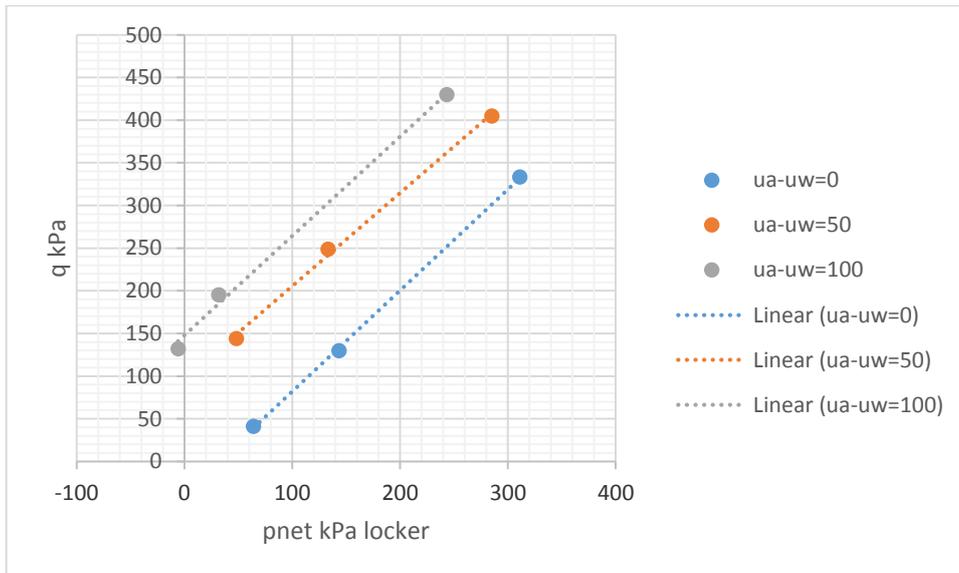


Abbildung 59: p<sub>net</sub>-q Diagramm, D-Versuche, mit lockerem Boden

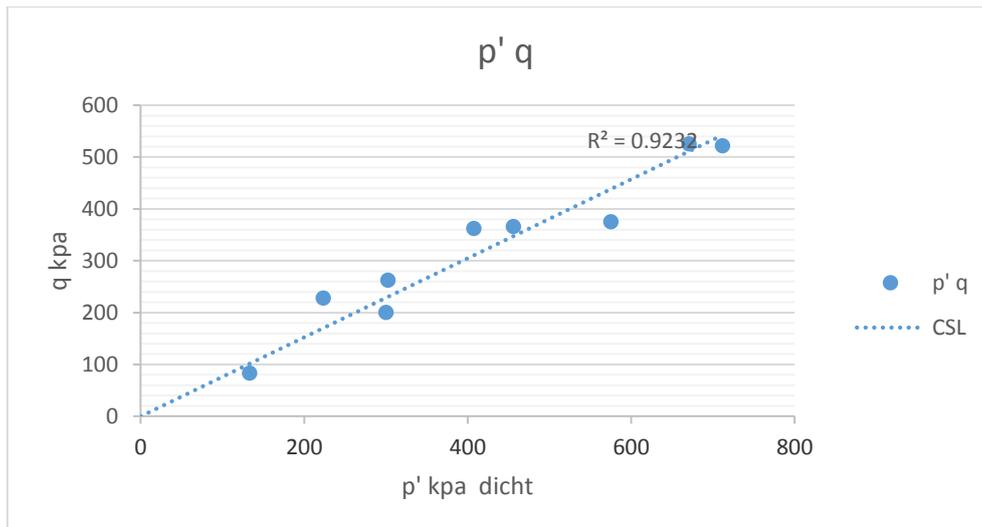


Abbildung 60:  $p'$ -  $q$  Diagramm, D-Versuche, mit dichtem Boden

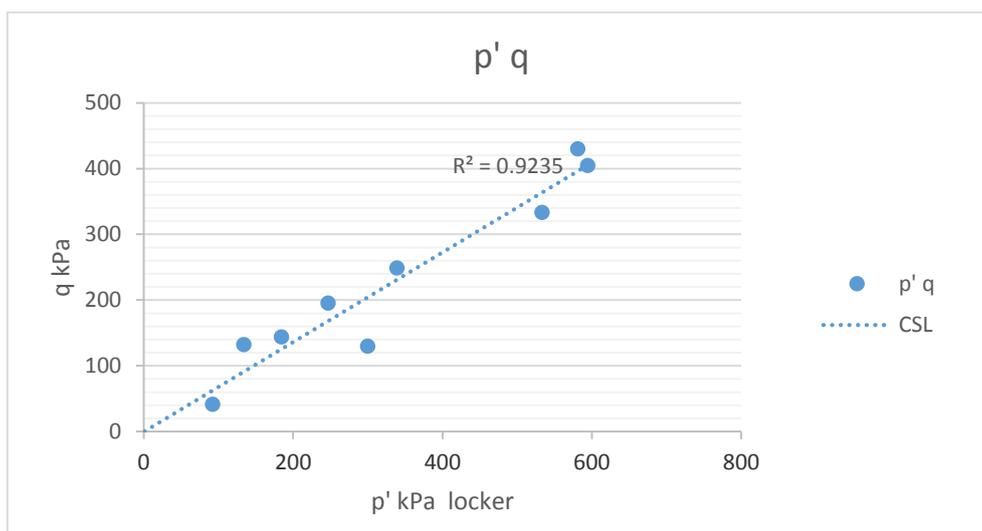


Abbildung 61:  $p'$ -  $q$  Diagramm, D-Versuche, mit lockerem Boden

## 8. Interpretation der Versuchsergebnisse

Auf der Ordinate der Spannungsdehnungskurve wird die deviatorische Spannung aufgetragen. Wie die Theorie besagt, erreichen die dichten Bodenproben ein Maximum der Spannungsdehnungskurve, während die lockeren Bodenproben allmählich einen Plateau erhalten. Je größer die Seitendrücke  $\sigma_3$  sind, umso größer ist die erreichte deviatorische Spannung. Das ist daran zu erkennen, dass die

lila gefärbten Spannungsdehnungskurven immer die Kurven sind, die am weitesten vom Koordinationursprung entfernt sind. Außerdem wirkt die Saugspannung ebenfalls positiv auf das Spannungs- und Dehnungsverhalten: Mit zunehmender Saugspannung steigt die deviatorische Spannung. Aus den Volumendehnungskurven kann festgestellt werden, dass die Versuche mit den lockeren Bodenproben eine Kontraktanz aufweisen. Unter Kontraktanz wird das Abfallen von Volumensdehnung  $\varepsilon_v$  mit Längstdehnung  $\varepsilon_1$  verstanden. Bei den dichten Bodenproben weisen die Versuche mit geringem Seitendruck eindeutige Dilatanz auf. Dilatanz bedeutet das Anwachsen von  $\varepsilon_v$  mit  $\varepsilon_1$ . Allerdings stellt der Versuch mit 50 kPa Saugspannung und mit den lockeren Bodenproben eine Ausnahme dar.

Aus den Mohr'schen Spannungskreisen können die Scherparameter wie Kohäsion und Reibungswinkel gewonnen werden. Zusammengefasst weisen die dichten Bodenproben eine höhere Kohäsion auf als die lockeren Bodenproben, wobei die Versuche mit 50 kPa Saugspannung sowohl bei den dichten als auch bei den lockeren Bodenproben eine höhere Kohäsion liefern als die mit 100 kPa. Abgesehen von dem gesättigten Versuch mit dichten Bodenproben steigt der Reibungswinkel in den anderen Versuchen mit der Zunahme der Saugspannung. Die Spannungspfade, die aus den Mohr'schen Spannungskreisen abgeleitet werden, korrelieren mit den Scherparametern. Die Ausgleichsgerade schließt mit der Abszisse den Winkel  $\alpha'$  ein und schneidet die Abszisse mit  $b'$ . Die wirksamen Scherparameter werden mit Hilfe folgender Beziehung aus den Werten  $\alpha'$  und  $b'$  berechnet (Schöfer, 2012):

$$\sin \varphi' = \tan \alpha'$$

$$c' = \frac{b'}{\cos \varphi'}$$

Der Ansatz „Critical State Line“ besagt, dass die Spannungszustände gesättigter und teilgesättigter Bodenproben unter gleichen Rahmenbedingungen auf einer Gerade liegen, die eben als Critical State Line bezeichnet wird. Die Abbildung 57 und 58 zeigen, dass die Spannungszustände der Versuche jeweils mit einer 93- und 92- prozentigen Korrelation auf der CSL liegen.

## 9. Zusammenfassung

Für die vorliegende Arbeit werden Probekörper des Modellbodens bei unterschiedlichen Lagerungsdichten hergestellt, und er wird unter gesättigter oder teilgesättigter Bedingung mit unterschiedlicher Konsolidationsspannung gesetzt und dann durch axiale Kompression abgeschert. Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurde die Theorie behandelt. Da weder eine neue Theorie aufgestellt noch eine alte Theorie widergelegt wird, ist dieser Teil kurz gehalten. Nach Coulomb setzt sich die Scherfestigkeit aus Reibung und Kohäsion zusammen. Reibung kann als Widerstand gegen die relative Bewegung verstanden werden. Es besteht eine direkte Proportion zwischen Reibung und Normalspannung, wobei der Proportionalitätsfaktor als eine Winkelfunktion zusammengefasst wird. Kohäsion liegt vielen Ursachen zugrunde. Kohäsion wirkt zusammenhaltend zwischen den Feststoffpartikeln und ist unabhängig von der Normalspannung. Der Begriff Saugspannung muss näher ausgelegt werden, denn der Begriff ist nicht unumstritten. Die Retentionskurve zeigt den Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt und ist wichtig für die Bestimmung der effektiven Spannung bei Versuchen mit teilgesättigten Böden.

Der Versuchsboden wurde durch unterschiedliche Methoden wie Bestimmung der Korngrößenverteilung, Proktorversuche, Atterberg'sche Versuche etc. beschrieben und klassifiziert. Die daraus gewonnene Erkenntnis ist wichtig für weitere Untersuchungen des Scherverhaltens des Bodens.

Es wurden insgesamt 18 Versuche mit unterschiedlichen Saugspannungen und Seitendrücken in der Abschlussarbeit aufgezeichnet. Ihre Ergebnisse sind Spannungsdehnungskurven, Volumendehnungskurven, Mohr'sche Spannungskreise, Spannungspfade und die „Critical State Line“. Die Interpretation der Versuchsergebnisse wird in einem eigenen Kapitel ausgelegt.

## 10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kornfraktion (Soranzo, 2014) .....	26
Tabelle 5: Phasen der Versuche .....	33
Tabelle 6: Testübersicht .....	70
Tabelle 7: Scherparameter der D-Versuche, mit dichtem Boden .....	80
Tabelle 8: Scherparameter der D-Versuche, mit lockerem Boden .....	80

## 11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mohr-Coulomb Darstellung der Scherfestigkeit (Henning/Schmidt, 2006 modifiziert) .....	13
Abbildung 2: Scherverformung bei dichter und lockerer Ausgangsdichte (Taylor, 1948) .....	15
Abbildung 3: Einfluss der Porenzahl auf den Reibungswinkel (Zentrum-Geotechnik, 2014) ..	17
Abbildung 4: Durchmesserabhängigkeit des Rollreibungskoeffizienten bei Quarzsand (nach Rome, 1962).....	17
Abbildung 5: Detail eines Kontaktbereiches zwischen zwei Körpern (nach Lambe, Whitman, 1969).....	18
Abbildung 6: stochastische Betrachtung der Haftreibung und Gleitreibung (nach Lambe, Whitman, 1969).....	19
Abbildung 7: Wasserbindung an Bodenkörner (Kuntze, Roeschmann, Schwerdtfeger, 1994)	21
Abbildung 8: Van-Genuchten Kurve .....	23
Abbildung 9: Kornverteilungskurve (Soranzo, 2014) .....	25
Abbildung 10: Casagrande Diagramm (Soranzo, 2014).....	26
Abbildung 11: Proctor Test (Soranzo, 2014) .....	27
Abbildung 12: Retentionskurve für Bodenprobe mit Trockendichte $1.66 \text{ g/cm}^3$ .....	27
Abbildung 13: Retentionskurve für Bodenprobe mit Trockendichte $1.72 \text{ g/cm}^3$ .....	28

Abbildung 14: Retentionkurse für Bodenprobe mit Trockendichte $1.8 \text{ g/cm}^3$ .....	28
Abbildung 15: Bruchformen dichter und lockerer Proben im triaxialen Kompressionsversuch (Kolymbas, 2007) .....	30
Abbildung 16: Komponentenzusammenstellung Triaxialanlage (WILLE, 2008) .....	35
Abbildung 17: Gesamtansicht der Prüfpresse (WILLE , 2008) .....	36
Abbildung 18: Zellbodenplatte der Triaxialprüfzelle .....	38
Abbildung 19: Ansicht APC (Schöfer, 2012) .....	38
Abbildung 20: Ansicht VPC (WILLE , 2008) .....	40
Abbildung 21: Elektronische Volumenmesseinrichtung (Schöfer, 2012).....	42
Abbildung 22: Druckluft-Wasser Zylinder und Volumenmesseinrichtung .....	44
Abbildung 23: Wasser-Entgasungsanlage (Schöfer, 2012) .....	45
Abbildung 24: Triaxialprüfzelle .....	46
Abbildung 25: Porenwasserdrucksensor (Schöfer, 2012) .....	47
Abbildung 26: Spannzyylinder.....	53
Abbildung 27: Triaxialzelle (Schöfer, 2012).....	54
Abbildung 28: eine Prüfvorschrift für gesättigten Triaxialversuch .....	61
Abbildung 29: Abfrageprotokoll für einen teilgesättigten Versuch .....	62
Abbildung 30: empfohlene Diagrammzusammenstellung, gesättigter Versuch .....	63
Abbildung 31: Darstellen eines Diagramms.....	64
Abbildung 32: Darstellen eines vollständigen B-Tests .....	66
Abbildung 33: Prüfkörper am Ende eines Versuchs .....	68
Abbildung 34: Spannungs-Verformung, gesättigter D-Versuch, dicht.....	71
Abbildung 35: Volumendehnung, gesättigter D-Versuch, dicht .....	71
Abbildung 36: Spannungs-Verformung, gesättigter D-Versuch, locker .....	72
Abbildung 37: Volumendehnung, gesättigter D-Versuch, locker .....	72
Abbildung 38: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung=50 kPa .....	73
Abbildung 39: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 50 kPa ..	73

Abbildung 40: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa .....	74
Abbildung 41: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa.	74
Abbildung 42: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa .....	75
Abbildung 43: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa	75
Abbildung 44: Spannungs-Verformung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa .....	76
Abbildung 45: Volumendehnung, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa	76
Abbildung 46: Mohr'scher Spannungskreis, gesättigter D-Versuch, dicht .....	77
Abbildung 47: Mohr'scher Spannungskreis, gesättigter D-Versuch, locker.....	77
Abbildung 48: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 50 kPa .....	78
Abbildung 49: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa .....	78
Abbildung 50: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa .....	79
Abbildung 51: Mohr'scher Spannungskreis, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa .....	79
Abbildung 52: Spannungsfaden, gesättigter D-Versuch, dicht .....	81
Abbildung 53: Spannungsfaden, gesättigter D-Versuch, locker.....	81
Abbildung 54: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 50 kPa ....	82
Abbildung 55: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 50 kPa...	82
Abbildung 56: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, dicht, Saugspannung= 100 kPa ..	83
Abbildung 57: Spannungsfaden, teilgesättigter D-Versuch, locker, Saugspannung= 100 kPa.	83
Abbildung 58: pnet-q Diagramm, D-Versuche, mit dichtem Boden .....	84
Abbildung 59: pnet-q Diagramm, D-Versuche, mit lockerem Boden .....	84
Abbildung 60: p'- q Diagramm, D-Versuche, mit dichtem Boden .....	85
Abbildung 61: p'- q Diagramm, D-Versuche, mit lockerem Boden.....	85

## 12. Literaturverzeichnis

- Adam. (2013). *Grundbau und Bodenmechanik I*. Wien: Technische Universität Wien.
- Atkins, Paula. (2006). *Physikalische Chemie*. Deutschland: Wiley-VCH Verlag.
- Delage. (2002). Experimental unsaturated soil mechanics. *Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT'2002*, S. 973-996.
- Kammerer. (2012). *Bodenphysik Vertiefung*. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Koliji. (2008). *Mechanical Behaviour*. Iran: Iran University of science and technology.
- Kolymbas. (2007). *Geotechnik-Geotechnik, Grundbau und Tunnelbau*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Möller. (2012). *Geotechnik-Bodenmechanik*. Berlin: Ernst und Sohn.
- Nuth, Laloui. (6. July 2007). Effective Stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, S. 771-801.
- Schöfer. (2012). *Untersuchung der Scherparameter eines Feinmittelsandes im gesättigten und teilgesättigten Zustand*. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Soranzo. (2014). *Experimental and numerical investigations of face stability of shallow tunnels in partially saturated soil*. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Verruijt, A. (2006). *SOIL MECHANICS*. Delft: Delft University of Technology.
- Zentrum-Geotechnik. (2014). *Technische Universität München*. Von [http://www.gb.bv.tum.de/fileadmin/w00bpk/www/Lehre/Studienunterlagen/Vorlesungsskript/12\\_vorlg-i.pdf](http://www.gb.bv.tum.de/fileadmin/w00bpk/www/Lehre/Studienunterlagen/Vorlesungsskript/12_vorlg-i.pdf) abgerufen