

Diplomarbeit

Mehrstufige Triaxialversuche bei Lockergesteinsböden: Anwendung in der Laborpraxis und Vergleich mit üblichen Triaxialversuchen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Multi-stage Triaxial Tests on Different Types of Soil: Application in Laboratory Practice and Comparison with Conventional Triaxial Tests

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Döller Philipp, BSc

Matr.Nr.: 11802543

Betreuung: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**
Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. **Roman Markiewicz**
Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/220-02, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Oktober 2024



Kurzfassung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Anwendung der Mehrstufentechnik bei Triaxialversuchen mit Lockergesteinsböden. Ziel ist es, ein automatisiertes Prüfverfahren zu erstellen, mit welchem mehrstufige Triaxialversuche mit verschiedenen Bodenarten durchgeführt werden können.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden anhand der einschlägigen Literatur verschiedene Methoden zur Durchführung des Mehrstufenversuches beleuchtet. Aus diesen Methoden wurde anschließend ein Prüfablauf für die gegenständliche Arbeit definiert, bei welchem zwei verschiedene Abbruchbedingungen für die einzelnen Stufen des Mehrstufenversuches festgelegt wurden. Die erste Abbruchbedingung unterbricht den Versuch, sobald die maximale Volumenkontraktion erreicht ist. Die zweite Abbruchbedingung wird erfüllt, wenn ein angenäherter Tangentenmodul einen definierten Anfangsmodul unterschreitet. Die beiden Bedingungen werden laufend überprüft und bei Erreichen eines Kriteriums wird die jeweilige Stufe unterbrochen.

Um diesen definierten Prüfablauf im Erdbaulabor der TU Wien anzuwenden, wurden mit Probekörpern aus verschiedenen Böden konventionelle und mehrstufige Triaxialversuche durchgeführt. Parallel zu diesen Versuchen wurde eine Prüfvorschrift programmiert, welche der automatisierten Steuerung der Triaxialversuchsanlage dient. Dabei wurde die Prüfvorschrift so programmiert, dass der Schervorgang des mehrstufigen Triaxialversuches bei Erreichen einer Abbruchbedingung gestoppt, das Seitendruckniveau auf die nächste Stufe gehoben und der Versuch wieder fortgesetzt wird. Mit dieser entwickelten Prüfvorschrift wurden einige mehrstufige Triaxialversuche erfolgreich durchgeführt. Es zeigten sich jedoch auch Schwächen, welche anhand weiterer Forschung untersucht werden müssen.

In dieser Arbeit wurden mit zwei verschiedenen Böden konventionelle und mehrstufige Triaxialversuche durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den konventionellen und den mehrstufigen Triaxialversuchen zeigte, dass bei Anwendung des Abbruchkriteriums der maximalen Volumenkontraktion vergleichbare Ergebnisse erzielt werden konnten, bei Anwendung des anderen Kriteriums mit dem angenäherten Tangentenmodul jedoch größere Abweichungen vorlagen. Diese Aussagen sind jedoch nur begrenzt aussagekräftig, da jeweils nur ein Versuch durchgeführt wurde. Um diese Aussage zu validieren, bedarf es weiterer Versuche.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

This thesis focuses on the application of the multi-stage technique in triaxial tests with soil material. The goal is to develop an automated testing procedure that allows multi-stage triaxial tests to be conducted with various soil types.

Different methods for conducting multi-stage tests were reviewed based on relevant literature to achieve this goal. From these methods, a testing procedure was defined for this study, where two different failure criteria were established for the individual stages of the multi-stage test. The first criterion terminates the test when the maximum volumetric contraction is reached. The second criterion is met when the approximated tangent modulus falls below a defined initial modulus. Both conditions are continuously monitored, and the test is interrupted when a criterion is met.

Conventional and multi-stage triaxial tests were conducted on specimens made from different soils to apply this defined testing procedure in the geotechnical laboratory at TU Wien. Parallel to these tests, a testing protocol was programmed to automate the control of the triaxial testing machine. The testing protocol was programmed such that the shearing process of the multi-stage triaxial test stops when a failure criterion is reached, the lateral pressure level is raised to the next stage, and the test resumes. Several multi-stage triaxial tests were successfully conducted using the developed testing protocol. However, weaknesses were identified, which need further investigation.

In this study, conventional and multi-stage triaxial tests were conducted with two different soils. The comparison of results between the conventional and multi-stage triaxial tests showed that the application of the failure criterion for maximum volumetric contraction led to similar results, while the other criterion led to greater deviations in the results. However, these findings are of limited significance, as only one test was conducted for each soil. Significantly more tests are required to validate these conclusions.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Markiewicz, für seine kontinuierliche Unterstützung, seine fachliche Expertise und seine wertvollen Anregungen während der gesamten Arbeit. Ebenso möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam und dem gesamten Laborteam bedanken, die mir nicht nur mit ihrem Fachwissen, sondern auch mit ihrer unermüdlichen Hilfsbereitschaft zur Seite standen und maßgeblich zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein großer Dank gilt auch meinen Eltern, die mich über all die Jahre hinweg mit ihrer bedingungslosen Unterstützung und ihrem Vertrauen gestärkt haben. Ohne ihren Rückhalt wäre mein Studium in dieser Weise nicht möglich gewesen.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Studienkollegen danken. Die herausfordernden Prüfungen und intensiven Studienjahre wären ohne unsere gemeinsame Unterstützung und das gegenseitige Motivieren kaum zu bewältigen gewesen. Eure Freundschaft und euer Beistand haben mich durch viele Höhen und Tiefen des Studiums getragen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	3
Abstract.....	5
Danksagung	7
Inhaltsverzeichnis	9
1 Einleitung.....	13
1.1 Geotechnische Versuche im Allgemeinen.....	13
1.2 Forschungsfrage und Methodik.....	13
2 Theoretische Grundlagen zum Triaxialversuch.....	15
2.1 Effektive und totale Spannungen.....	15
2.2 Scherfestigkeit	17
2.2.1 Reibungswinkel	17
2.2.2 Reibungsfestigkeit.....	18
2.2.3 Kohäsion	19
2.2.4 Versagenskriterium.....	20
2.2.5 Restscherfestigkeit	22
2.2.6 Einflussgrößen auf das Spannungs-Verformungs-Verhalten	22
3 Triaxialversuch	23
3.1 Allgemeines zum Triaxialversuch.....	23
3.2 Anwendung des Versagenskriteriums zur Auswertung des Triaxialversuches	25
3.3 Prüfanlage	28
3.4 Probenherstellung und Einbau in die Triaxialversuchsanlage.....	36
3.5 Ablauf eines Triaxialversuches	39
3.6 Österreichische Normen für Triaxialversuche.....	40
3.7 Erläuterung des Prüfablaufes anhand der Prüfvorschrift	41
3.7.1 Allgemeines zur Prüfvorschrift.....	41
3.7.2 Initialbedingungen	41
3.7.3 Sättigung	43
3.7.4 B-Test.....	44
3.7.5 Konsolidation.....	46

3.7.6	Abscheren	49
4	Mehrstufiger Triaxialversuch.....	53
4.1	Allgemeines.....	53
4.2	Normen und Regelwerke.....	54
4.3	Überlegungen zur Versuchsdurchführung	55
4.3.1	Wissenschaftliche Beiträge zur Versuchsdurchführung	55
4.3.2	Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit.....	59
4.4	Überlegungen zu den Abbruchkriterien	59
4.4.1	Wissenschaftliche Beiträge zu den Abbruchkriterien.....	59
4.4.2	Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit.....	66
4.5	Überlegungen zur Konstruktion der Bruchgeraden	67
4.5.1	Wissenschaftliche Beiträge zur Konstruktion der Bruchgeraden.....	67
4.5.2	Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit.....	69
4.6	Erläuterung des mehrstufigen Prüfablaufes anhand der entwickelten mehrstufigen Prüfvorschrift.....	69
4.6.1	Allgemeines zur mehrstufigen Prüfvorschrift	69
4.6.2	Mehrstufige Prüfvorschrift – Stufe 1	71
4.6.3	Mehrstufige Prüfvorschrift – Stufe 2	76
4.6.4	Mehrstufige Prüfvorschrift – Stufe 3	77
4.7	Excel-Tool zur Auswertung der mehrstufigen Triaxialversuche.....	78
5	Laborversuche – Übersicht und vorbereitende Arbeiten	81
5.1	Probenmaterialien und Versuchsübersicht.....	81
5.2	Herstellung der Probekörper	82
5.3	Einaxiale Druckversuche	85
5.3.1	Theoretische Grundlagen.....	85
5.3.2	Versuchsergebnisse.....	86
6	Laborversuche - konventionelle und mehrstufige Triaxialversuche.....	88
6.1	Arbeitsschritt 1	88
6.1.1	Vorversuch mit dem Material 998_1	88
6.2	Arbeitsschritt 2	89
6.3	Arbeitsschritt 3	89
6.4	Arbeitsschritt 4	89
6.4.1	Konventioneller Triaxialversuch mit dem Material 998_2	89
6.4.2	Mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_2	92
6.5	Arbeitsschritt 5	94
6.5.1	Konventionelle Triaxialversuche mit dem Material 998_5	94

6.5.2	Erster mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_1)	97
6.5.3	Zweiter mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_2)	101
6.5.4	Dritter mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_3).....	104
6.5.5	Vierter mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_4).....	107
6.5.6	Vergleich der konventionellen- und der mehrstufigen Triaxialversuche mit dem Material 998_5	110
6.6	Arbeitsschritt 6.....	110
6.6.1	Mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_6	110
6.7	Arbeitsschritt 7.....	114
6.7.1	Konventionelle Triaxialversuche mit dem Material 998_2	114
6.7.2	Mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_2	123
6.7.3	Vergleich der konventionellen- und der mehrstufigen Triaxialversuche mit dem Material 998_2	126
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
8	Literaturverzeichnis.....	133



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

1.1 Geotechnische Versuche im Allgemeinen

Um erdstatische Berechnungen durchführen zu können, werden Parameter benötigt, die den Boden, welcher als Baustoff oder Baugrund eingesetzt wird, beschreiben. Diese Parameter werden in Feld- und Laborversuchen ermittelt oder beruhen auf Erfahrungen. Die bodenmechanischen Laborversuche sind das Bindeglied zwischen dem Material Boden und den Berechnungsparametern, also den Zahlenwerten, welche als Eingangsparameter für analytische und numerische Berechnungen herangezogen werden.

Es gibt eine Vielzahl an Feld- und Laborversuchen, um das komplexe Verhalten des Bodens zu beschreiben. Die Versuche dienen unter anderem der bodenmechanischen Klassifikation, der Ermittlung der Festigkeits- und Verformungsparameter sowie der Beschreibung des geohydraulischen Verhaltens des Bodens.

Am Beginn der Ermittlung der Bodenparameter steht die Erkundung des Baufeldes. Die Anzahl der Probenentnahmen ist dabei immer eine Abwägung zwischen Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit, wobei hier zu erwähnen ist, dass eine genauere Erkundung nur einen Bruchteil jener Kosten verursacht, welche durch eine nachträgliche Änderung des Bauablaufes aufgrund unbekannter Bodenverhältnisse anfallen würden. Nach Analyse der entnommenen Proben erfolgt üblicherweise eine Einteilung in möglichst homogene Bodenschichten. Ziel ist es, ein Schichtmodell des Bodens zu generieren, bei welchem jede Schicht mit gewissen Parametern definiert ist. Die Generierung dieser Parameter erfolgt mittels Untersuchungen im Labor, wobei die Güte der Laboruntersuchungen stark von der Probenentnahme, der Probenlagerung sowie der Versuchsdurchführung abhängt.

Neben allgemeinen Parametern wie zum Beispiel der Dichte des Bodens werden vor Allem die Scherparameter Reibungswinkel und Kohäsion benötigt, um erdstatische Berechnungen durchführen zu können. Ein über Jahrzehnte erprobter und anerkannter Versuch zur Ermittlung dieser Scherparameter ist der Triaxialversuch. Bei diesem werden in der Regel für jeden Versuch drei möglichst gleiche Probekörper aus der zu untersuchenden Bodenschicht benötigt. Diese Probekörper werden mit verschiedenen Spannungen belastet und bis zum Bruch abgeschert. Aus den gemessenen Spannungen können nachfolgend die Scherparameter ermittelt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem Verfahren, bei welchem statt drei Probekörpern nur ein Probekörper abgeschert wird. Dieses Verfahren wird als mehrstufiger Triaxialversuch bezeichnet. Der mehrstufige Triaxialversuch ist kein neues Verfahren, jedoch kommt er bisher selten zur Anwendung und wurde im Erdbaulabor der TU Wien bisher nicht angewendet.

Dieses Verfahren im Labor der TU Wien zu erarbeiten und durchzuführen ist Thema dieser Diplomarbeit.

1.2 Forschungsfrage und Methodik

Wie zuvor kurz beschrieben, kommt in der geotechnischen Laborpraxis im Regelfall der herkömmliche Triaxialversuch zu Anwendung und ist somit Stand der Technik. Die Durchführung dieses Versuches ist normativ in der ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] sowie in der ÖNORM EN 17892-8 [2] geregelt.

Um die Scherparameter einer Bodenschicht mit dem Triaxialversuch bestimmen zu können, werden drei Probekörper mit möglichst identischen Eigenschaften aus der zu untersuchenden Schicht benötigt. Diese Probekörper sollten anschließend möglichst gleichartig gelagert und für den Versuch vorbereitet werden. Ein herkömmlicher Triaxialversuch umfasst mindestens drei Einzelversuche, bei welchen die Probekörper mit verschiedenen Seitendrücken beaufschlagt werden. Wird ein konsolidierter, drainierter Triaxialversuch (CD-Versuch) durchgeführt, so durchläuft jeder Probekörper die Phasen Sättigung, Konsolidation und Abscheren. Diese Vorgänge benötigen je nach Bodenart mehrere Stunden bis zu mehreren Wochen. Demzufolge entstehen hohe Kosten für Personal und Gerätschaft.

Aufgrund der genannten Problembereiche hat sich ein Verfahren entwickelt, bei welchem statt drei Probekörpern aus der jeweiligen Schicht nur ein Probekörper untersucht werden muss, um die Scherparameter bestimmen zu können. Dieses Verfahren wird als mehrstufiger Triaxialversuch bezeichnet. Dabei wird ein Probekörper mit verschiedenen Seitendrücken beaufschlagt und jeweils nur bis kurz vor den Bruch belastet. Mit dieser Methode können aus den aufgezeichneten Daten der einzelnen Stufen ausreichend Informationen generiert werden, um die Scherparameter des Probekörpers ermitteln zu können. Die genaue Vorgangsweise wird in Kapitel 4 erläutert.

Die Vorteile des mehrstufigen Triaxialversuches gegenüber dem herkömmlichen Triaxialversuch sind vielfältig. Oftmals ist die Anzahl der Probekörper bzw. die Menge des Probematerials begrenzt und es ist demnach ein erheblicher Vorteil, wenn nur ein Probekörper anstatt drei Probekörper untersucht werden muss. Weiters fällt die Streuung zwischen den drei Probekörpern, welche eine Schicht repräsentieren, weg. Die Versuchsdauer reduziert sich ebenfalls erheblich, da der Probeneinbau sowie die Sättigung nur einmal durchgeführt werden müssen. Die Reduktion der Zeit führt in der Regel auch zu einer Reduktion der Kosten.

Gegenüber den genannten Vorteilen stehen auch Nachteile wie die bisher fehlende Normung für mehrstufige Triaxialversuche. Weiters kann dieses Verfahren nicht für jede Bodenart angewendet werden, da bei spröden Materialien der Bruch zu plötzlich auftritt. Der Umstand, dass nur ein Probekörper aus einer Schicht entnommen wird, bringt zwar einerseits den Vorteil, dass die Streuung wegfällt, jedoch auch den Nachteil, dass nur ein Probekörper die gesamte Schicht repräsentiert.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Grundlagen zur Durchführung eines mehrstufigen Triaxialversuches zu erarbeiten und im Labor anzuwenden. Weiters soll eine Prüfvorschrift im Programm GEOsys erarbeitet werden, mit welcher ein automatisierter mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt werden kann.

Die Forschungsfrage, welche dieser Arbeit zugrunde liegt, lautet daher: Entwicklung einer Prüfvorschrift für einen mehrstufigen Triaxialversuch.

Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurde mit der folgenden Methodik vorangegangen:

Zu Beginn der Arbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche zum Thema Mehrstufentechnik bei Triaxialversuchen durchgeführt. Der Großteil der wissenschaftlichen Arbeiten zu mehrstufigen Triaxialversuchen behandelt die Beprobung von Festgestein. Es wurden jedoch auch einzelne Arbeiten gefunden, bei welchen Bodenproben mit mehrstufigen Triaxialversuchen untersucht wurden. Diese dienten als guter Anhaltspunkt für die Entwicklung des Prüfverfahrens im Erdbaulabor der TU Wien.

In einem nächsten Arbeitsschritt wurden mit verschiedenen Böden einaxiale Druckversuche durchgeführt. Diese Versuche dienten der Findung eines geeigneten Materials. Um mehrstufige Triaxialversuche optimal durchführen zu können, sollte der zu untersuchende Probekörper einen

ausgeprägt plastischen Bereich in der Spannungs-Dehnungs-Kurve aufweisen und nicht spröd reagieren. Diese Anforderung konnte in einfachen Druckversuchen schnell überprüft werden.

Im Anschluss daran wurden zunächst konventionelle Triaxialversuche durchgeführt. Diese dienten zu Beginn vor Allem dem Verständnisaufbau für die Triaxialversuchsanlage. Weiters wurde anhand von herkömmlichen Triaxialversuchen die bereits vorhandene Prüfvorschrift, welche die Prüfmaschine steuert, analysiert und dadurch die Befehlsstruktur erlernt.

Nachdem ein Verständnis für die Apparatur generiert wurde, konnte mit der Programmierung des mehrstufigen Prüfablaufes begonnen werden. Dabei ging es in erster Linie darum, Abbruchbedingungen zu definieren, bei welchen der mehrstufige Abschervorgang unterbrochen wird und mit der nächsten Stufe fortgesetzt wird. Es wurden die beiden am häufigsten verwendeten Kriterien aus der vorliegenden Literatur herangezogen und zuerst händisch in Excel programmiert.

In einem nächsten Schritt wurden manuell gesteuerte mehrstufige Triaxialversuche durchgeführt. Dabei wurde der Versuch beobachtet und bei Erreichen eines definierten Abbruchkriteriums wurde manuell die nächste Stufe eingeleitet. Dieser Vorgang wurde einige Male wiederholt und im Zuge dessen wurde laufend an der gezielten Programmierung der Prüfvorschrift gearbeitet.

Nach mehreren Testversuchen konnte mit der erstellten Prüfvorschrift ein automatisierter mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt werden.

In einem abschließenden Schritt wurden mit zwei unterschiedlichen Böden herkömmliche Triaxialversuche durchgeführt und diese mit den mehrstufigen Versuchen verglichen. Weiters wurde ein Auswertungstool mit der Software Excel erstellt.

2 Theoretische Grundlagen zum Triaxialversuch

2.1 Effektive und totale Spannungen

Bei wassergesättigten Böden (Regelfall bei Triaxialversuchen) muss beachtet werden, dass ein Teil der aufgeprägten äußeren Lasten vom Porenwasser in Form eines Porenwasserdruckes aufgenommen werden kann. Je nach Drainagebedingungen wird dieser mit der Zeit abgebaut. Um diesen Umstand besser verstehen zu können, wird in Abb. 2.1 ein einfaches Modell einer undrainierten Probe dargestellt. [3]

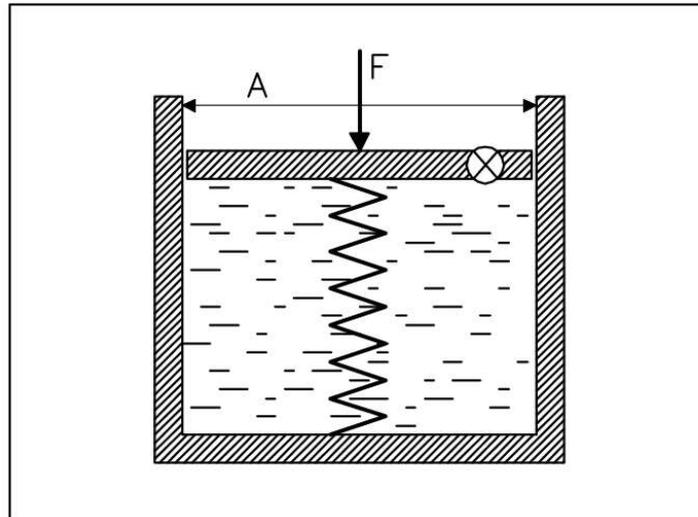


Abb. 2.1: Veranschaulichung Porenwasserdruck/effektive Spannungen [3]

Die Abb. 2.1 zeigt ein geschlossenes Gefäß, welches mit einem Ventil ausgestattet ist. In dem Gefäß befinden sich Wasser sowie eine Feder, welche das Korngerüst darstellen soll. Sowohl das Wasser als auch das Korngerüst sind für sich inkompressibel. Wird nun eine Spannung $\sigma = F / A$ aufgebracht und das Ventil bleibt geschlossen, wird die gesamte Spannung vom Porenwasserdruck u aufgenommen, da sich die Feder nicht verformen und somit keine Kraft aufnehmen kann. Wird das Ventil (Drainage) etwas geöffnet, sodass Wasser langsam austreten kann, so wird allmählich ein Teil der Spannung von der Feder (Korngerüst) abgetragen. Dieser Anteil berechnet sich aus der Differenz $\sigma - u$, was als effektive Spannung mit dem Symbol σ' bezeichnet wird. Aus diesen Konventionen folgt nun folgender Zusammenhang zwischen Porendruck u und effektiver Spannung σ' : [3]

$$\sigma' = \sigma - u$$

Anders ausgedrückt, kann die totale Spannung σ auch angeschrieben werden zu:

$$\sigma = \sigma' + u$$

Diese Erkenntnisse lassen sich nun zum Prinzip der effektiven Spannungen verallgemeinern. Die Aussage dieses Prinzipes ist, dass für eine Verformung bzw. die Festigkeit einer Bodenprobe lediglich die effektive Spannung σ' und nicht der Porendruck u verantwortlich ist. Eingeführt wurde dieses Prinzip durch *Karl von Terzaghi*, welcher es folgendermaßen beschrieben hat: [3]

„Die Spannungen in jedem Punkt einer Schnittfläche durch eine Bodenmasse können berechnet werden aus den Hauptwerten σ_1 , σ_2 und σ_3 der totalen Spannungen, die an diesem Punkt wirken. Wenn die Poren mit Wasser gefüllt sind, das unter einem Druck p steht, dann bestehen die totalen Hauptspannungen aus zwei Anteilen. Der eine Anteil, p , wirkt im Wasser in den Poren und hat den gleichen Betrag in jeder Richtung. Er heißt die neutrale Spannung (neutral stress) oder Porenwasserdruck (pore water pressure). Der verbleibende Anteil $\sigma'_1 = \sigma_1 - p$, $\sigma'_2 = \sigma_2 - p$, $\sigma'_3 = \sigma_3 - p$ repräsentiert den Überschuss über den Porenwasserdruck und ist ausschließlich im Korngerüst angesiedelt. Dieser Anteil der totalen Hauptspannungen nennt man die effektive Hauptspannungen (effective principal stress) . . . Eine Änderung der neutralen Spannung p ruft praktisch keine Volumenänderung hervor und hat praktisch keinen Einfluß auf die Spannungsbedingung des Bruchs . . .

Poröse Stoffe (wie Sand, Ton und Beton) reagieren auf eine Änderung von p so, als ob sie inkompressibel wären und als ob sie keine innere Reibung hätten. Alle meßbaren Effekte einer Spannungsänderung, wie Kompression, Gestaltänderung und Änderung des Scherwiderstandes sind ausschließlich Folgen einer Änderung der wirksamen Spannung σ'_1 , σ'_2 und σ'_3 . Somit benötigt man für die Stand-sicherheitsuntersuchung eines gesättigten Bodenkörpers die Kenntnis sowohl der totalen als auch der neutralen Spannung.“ [3]

Dieses von *Terzaghi* eingeführte Prinzip der effektiven Spannungen hatte und hat immense Bedeutung in der Bodenmechanik. Es muss jedoch festgehalten werden, dass es sich um ein Prinzip handelt, welches aus Erfahrungen und Beobachtungen schlussgefolgert wurde und kein Stoffgesetz darstellt.

Die hier angeführte Theorie der effektiven Spannungen setzt voraus, dass der Boden wassergesättigt ist. In ungesättigten Böden ist die Definition beträchtlich schwieriger und bisher auch noch nicht vollständig erforscht. Ein Ansatz von *Bishop* beschreibt die effektiven Spannungen in ungesättigten Böden wie folgt:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi \cdot (u_a - u_w), \quad 0 \leq \chi \leq 1$$

Darin ist u_a der Luftdruck, u_w der Wasserdruck und χ eine Funktion des Sättigungsgrades S . [3]

In der vorliegenden Arbeit wird die Theorie der effektiven Spannungen in ungesättigten Böden jedoch nicht näher beschrieben, da ausschließlich Triaxialversuche mit wassergesättigten Böden durchgeführt werden.

2.2 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit beschreibt eine von äußeren Kräften abhängige individuelle Widerstandskraft des Bodens, welche einer Verschiebung in einer Bruchfläche entgegenwirkt. Ist die Scherbeanspruchung, also die tatsächliche auftretende Belastung, größer als die Scherfestigkeit kommt es zum Versagen und somit zum Abgleiten in der Bruchfläche. [4]

Die Größe der Scherfestigkeit hängt von zwei Komponenten ab:

- Reibungsanteil: Dieser steht in direktem Zusammenhang mit der Größe der Normalspannungen an den Kontaktflächen der einzelnen Bodenkörner.
- Kohäsionsanteil: Dieser steht nicht im Zusammenhang mit den Normalspannungen, sondern kann als Folge innerer Spannungen angesehen werden, welche die einzelnen Körner aneinander ziehen.

2.2.1 Reibungswinkel

Der Reibungswinkel, welcher auch als Winkel der inneren Reibung bezeichnet wird, beschreibt jenen Winkel, unter dem der nichtbindige Boden belastet werden kann, ohne zu versagen bzw. abzurutschen. Das Formelzeichen des Reibungswinkels ist φ und die Einheit ist Grad, wobei in Berechnungen grundsätzlich der dimensionslose Tangens des Reibungswinkels verwendet wird. Die Anwendung von $\tan \varphi$ wird mit Abb. 2.3 im nächsten Abschnitt erläutert. Wenn der

nichtbindige Boden keine Kohäsion, welche in Kapitel 2.2.3 beschrieben wird, aufweist, so ist der natürliche Schüttwinkel in etwa ident mit dem Reibungswinkel. [4]

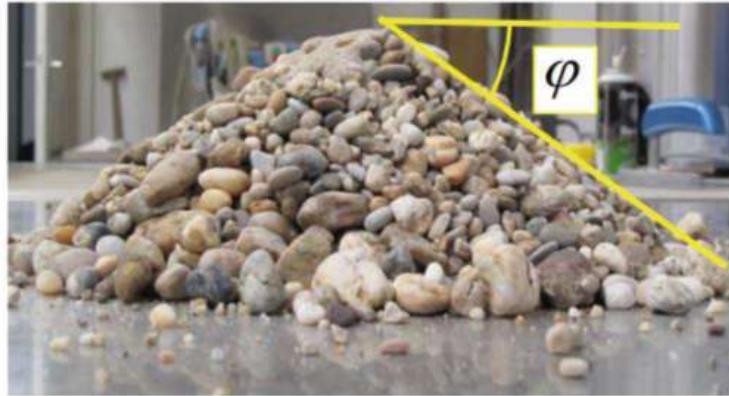


Abb. 2.2: natürlicher Schüttwinkel [4]

2.2.2 Reibungsfestigkeit

Betrachtet man den linken Teil der Abb. 2.3, ist leicht zu erkennen, dass eine gewisse Kraft F benötigt wird um den grauen Körper entgegen dem gelben Körper zu verschieben. Entgegen der Kraft F wirkt die so genannte Reibungskraft F_R . Die Größe der Reibungskraft ist von zwei Parametern abhängig. Dies ist einerseits die Normalkraft F_N , welche die beiden Körper aneinanderpresst und andererseits der Reibungskoeffizient μ , welcher die Rauigkeit der Fuge zwischen den beiden Körpern widerspiegelt. Die Reibungskraft F_R ist nach *Coulomb* wie folgt definiert: [4]

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

Die Reibungskraft F_R kann also als Widerstandskraft definiert werden, welche der Bewegung zwischen den zwei Körpern entgegenwirkt. Je nachdem ob die Kraft F kleiner als die Reibungskraft bleibt und somit keine Bewegung zwischen den Körpern stattfindet, oder die Kraft F den Wert der Reibungskraft erreicht und sich die Körper somit gegeneinander verschieben, können zwei Fälle unterschieden werden. Diese werden zum einen als Haftreibung und zum anderen als Gleitreibung bezeichnet und sind folgendermaßen definiert: [4]

$$\text{Haftreibung: } F < \mu \cdot F_N$$

$$\text{Gleitreibung: } F = \mu \cdot F_N$$

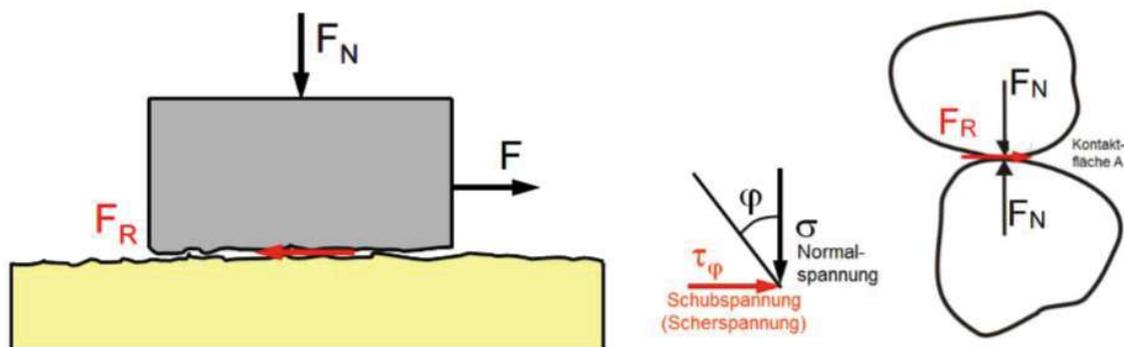


Abb. 2.3: *Coulomb'sche* Reibung zwischen zwei festen Körpern [4]

Betrachtet man nun den rechten Teil der Abb. 2.3, welcher den Boden bzw. die einzelnen Bodenkörner widerspiegeln soll, können sämtliche theoretische Überlegungen zur Reibungsfestigkeit übernommen werden. Um dies formal zu bewerkstelligen, muss der Reibungskoeffizient μ durch den Tangens des Reibungswinkels ersetzt werden.

$$\mu \rightarrow \tan \varphi$$

Die übertragbare Schubspannung τ_φ (Reibungskraft) ist demnach abhängig von der Größe der Kontaktschubspannung σ (Normalkraft) zwischen den Einzelkörnern, sowie von der Größe des Reibungswinkels φ (Reibungskoeffizient). Angeschrieben nach *Coulomb* ergibt sich die Formel:

$$\tau_\varphi = \sigma \cdot \tan \varphi$$

Anhand dieser Beziehung sieht man, dass somit keine Schubkraft über Reibung übertragen werden kann, wenn keine Korn-zu-Korn-Spannung σ vorhanden ist. Dies tritt im Normalfall nicht auf, da allein durch das Eigengewicht Korn-zu-Korn-Spannungen auftreten. Kommt es jedoch zu einer schnellen Belastung von wassergesättigten bindigen Böden können Porenwasserüberdrücke auftreten, welche Kontaktverluste der Körner zueinander zur Folge haben. [4] [3]

2.2.3 Kohäsion

Neben der Reibungsfestigkeit als Komponente der Scherfestigkeit muss auch der Anteil aus der Kohäsion berücksichtigt werden. Kommt es zu dem zuvor beschriebenen Fall, dass keine Normalspannungen zwischen den Körnern auftreten und somit die Reibungsfestigkeit null wird, hat der Boden in vielen Fällen trotzdem eine gewisse Scherfestigkeit. Dieser Anteil wird als Kohäsion mit dem Formelzeichen c bezeichnet.

Die Ursachen für Kohäsion sind vielfältig und noch nicht endgültig erforscht. Einige Mechanismen wie elektrostatische Anziehungskräfte, Kapillarität, Verkittungen sowie Verzahnungen sind jedoch bekannt, um eine Kohäsion zu bewirken.

Der durch diese Mechanismen entstehende innere Zusammenhalt kann vor allem bei feinkörnigen Böden große Spannungen annehmen. Es muss jedoch bedacht werden, dass eine ermittelte Kohäsion eines Bodens nur für einen bestimmten Wassergehalt und Verdichtungszustand gilt und bei Änderung dieser Parameter massiv abnehmen kann. Es ist also sicherzustellen, dass die Randbedingungen für die ermittelte Kohäsion bei dem konkreten Projekt gleichbleibend sind bevor in erdstatischen Berechnungen eine Kohäsion berücksichtigt wird.

Folgend werden bekannte Mechanismen für Kohäsion detaillierter beschrieben: [4]

- **Elektrostatische Anziehungskräfte**
In bindigen Böden sind vor allem die elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen den kleinen Bodenkörnern für die Kohäsion verantwortlich. Diese sind umso stärker, je kleiner der Abstand der Körner zueinander ist. Weiters verursacht auch die Oberflächenspannung des Wassers einen Anteil zur Kohäsion.
Da der innere Zusammenhalt, wie zuvor beschrieben, von der Größe der Körner, sowie vom Wassergehalt abhängt, geht mit zunehmender Korngröße oder mit zunehmendem Wassergehalt eine Reduktion der Kohäsion einher. Bei Wassergehalten welche eine breiige/flüssige Konsistenz herbeiführen, verschwindet die Kohäsion, da sich so viel Wasser im Boden befindet, dass der Abstand der Körner zueinander zunimmt. Wird der Boden hingegen

konsolidiert, was bedeutet, dass Wasser ausgepresst wird und die Körner zusammengeschoben werden, so nehmen die elektrostatischen Anziehungskräfte und somit die Kohäsion zu. [4]

- Kapillarkohäsion

Auch nichtbindige Böden (z.B. Sande) haben eine gewisse Kohäsion, wenn sich ihr Wassergehalt in einem bestimmten, meist recht engen Bereich befindet. Dabei werden die Bodenkörner durch die Oberflächenspannung des Wassers aneinandergespresst, vgl. Abb. 2.4, was es dem Boden ermöglicht Reibungskräfte zu übertragen.

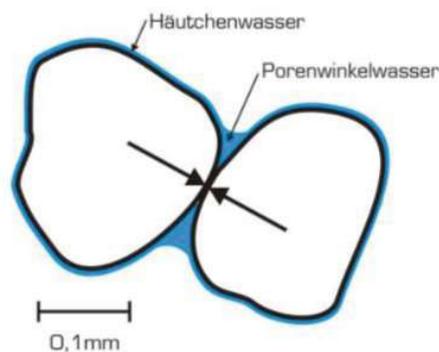


Abb. 2.4: Wirkung der Oberflächenspannung des Wassers auf Bodenkörner [4]

Wird jener Bereich des Wassergehaltes, in welchem dieses beschriebene Phänomen auftritt, überschritten oder auch unterschritten, so verschwindet diese Art der Kohäsion meist vollständig. Dieser Umstand ist sehr anschaulich beim Bau von kleinen Sandburgen zu beobachten. Jedoch auch bei großen Bauprojekten, wo anfangs steile Sandböschungen standfest sind und es dann z.B. zu einem Wasserzutritt kommt und es durch den Kohäsionsverlust schnell zu Schadensfällen kommen kann. [4]

- Verkittungskohäsion

Denkt man an die Wirkung von Zement, welcher die Gesteinskörner mittels der zementhaltigen Porenflüssigkeit bindet, so kann man sich auch eine etwaig auftretende Verkittung in der Natur erklären. Es können demnach durch die chemischen Eigenschaften des Porenfluids stabile Verkittungen entstehen, wie man es beispielsweise bei grobkörnigen kalkhaltigen Böden beobachten kann. [4]

- Verzahnungskohäsion

Mit dieser Art der Kohäsion lassen sich freistehende vertikale Böschungen von gut gestuften grobkörnigen Kantkornböden erklären. Durch gute Verdichtung entstehen Verzahnungen zwischen den Körnern, welche eine Art Kohäsion hervorrufen. Diese nimmt jedoch nur geringe Werte an und wird auch nicht für statische Berechnungen herangezogen. [4]

2.2.4 Versagenskriterium

Für die Auswertung bzw. Ermittlung der Parameter, welche schlussendlich die Scherfestigkeit des untersuchten Bodens beschreiben, gibt es verschiedene Stoffmodelle. Am häufigsten zur

Anwendung kommt das *Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium, da es mit zahlreichen Versuchen validiert und einfach auszuwerten ist. Weitere Modelle sind beispielsweise das *Modifizierte Drucker-Prager Modell*, das *Hardening Soil Modell* und das *Cam-Clay Modell*. Die Auswertung der Triaxialversuche in dieser Arbeit erfolgt nach *Mohr-Coulomb*, weshalb dieses hier beschrieben wird.

Das *Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium bezeichnet eine Grenzbedingung für die vom untersuchten Boden aufnehmbaren Schubspannungen. Diese aufnehmbaren Schubspannungen setzen sich zusammen aus der Kohäsion c und der Reibungsfestigkeit τ_ϕ . Es lässt sich demnach anschreiben zu: [4]

$$\tau = \tau_c + \tau_\phi \rightarrow \tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

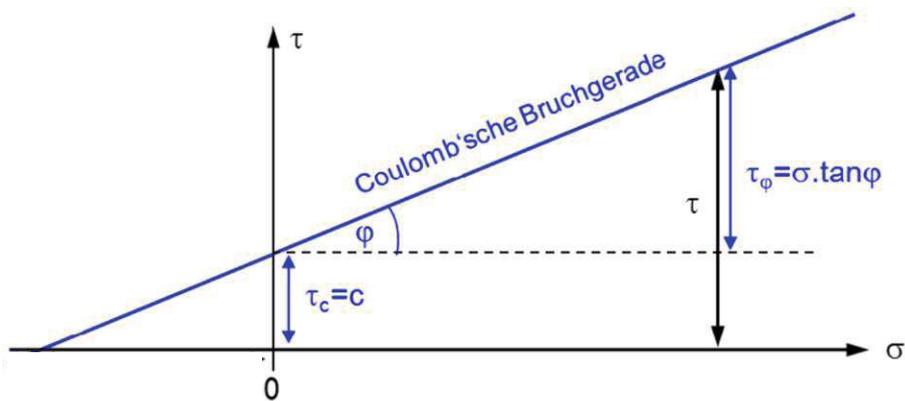


Abb. 2.5: *Coulomb'sche* Bruchgerade [4]

Im σ - τ -Diagramm wird der Reibungswinkel ϕ als Neigung der *Coulomb'schen* Bruchgeraden eingetragen. Die Kohäsion c wird als Schubspannung τ_c direkt an der Ordinate aufgetragen und ist somit nicht von der Normalspannung σ abhängig.

Das *Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium ist das am häufigsten angewendete Modell und es hat Gültigkeit bis zu einer Normalspannung von etwa 2 MN/m^2 . Ab dieser Spannung findet der Bruch von Einzelkörnern statt und die Bruchgerade würde sich somit abflachen. [4]

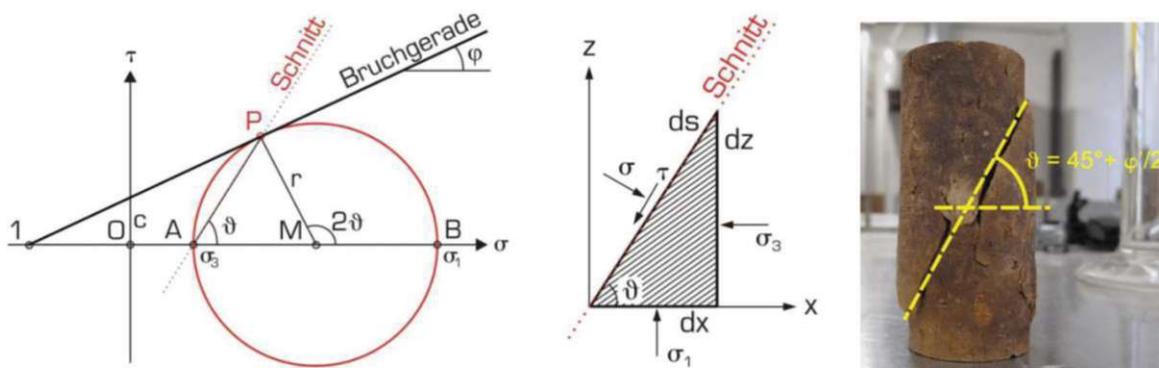


Abb. 2.6: Richtung der Versagensfläche zur Hauptspannungsrichtung [4]

Nach *Mohr-Coulomb* tritt Versagen genau dann ein, wenn der größte *Mohr'sche* Spannungskreis, welcher einen räumlichen Spannungszustand widerspiegelt, die Bruchgerade berührt. Im

Grenzzustand, welcher in Abb. 2.6 dargestellt ist, hängt das Versagen lediglich von der kleinsten Hauptspannung σ_3 sowie von der größten Hauptspannung σ_1 ab und die mittlere Hauptspannung σ_2 ist dabei nicht von Bedeutung.

Der Winkel zwischen Versagensfläche und Hauptspannungsrichtung wird in der Bodenmechanik als ϑ bezeichnet. Dieser kann im Grenzfall, welcher in Abb. 2.6 abgebildet ist, mit folgender Beziehung bestimmt werden: [4]

$$\vartheta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$$

Demnach ist die Richtung der Versagensfläche lediglich vom Reibungswinkel φ , nicht aber von der Kohäsion c abhängig. [4]

2.2.5 Restscherfestigkeit

Wird die maximale Scherfestigkeit τ_{\max} überschritten, kann eine Entfestigung des Bodens eintreten und die Scherfestigkeit τ fällt auf die sogenannte Restscherfestigkeit τ_r ab.

Unter Restscherfestigkeit wird der minimale Scherwiderstand unter konstanter Normalspannung σ verstanden, der sich nach sehr großen Scherverschiebungen in der Scherfuge einstellt. [4]

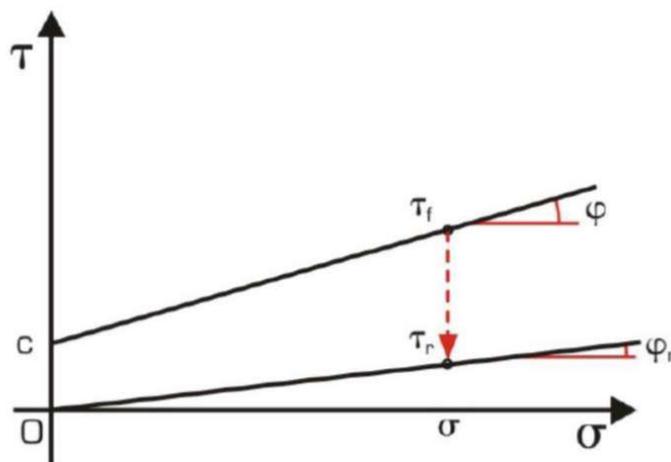


Abb. 2.7: Vergleich Bruchgerade beim erstmaligen Abscheren (c , φ) und nach dem Abscheren mit großer Scherverformung (φ_r) [4]

In Abb. 2.7 ist die Bruchgerade nach dem erstmaligen Abscheren zu sehen. Die Bruchgerade wird mit den Parametern Kohäsion c und Reibungswinkel φ beschrieben. Nachdem die Scherfestigkeit auf die konstante Restscherfestigkeit τ_r abgefallen ist, wird die Bruchgerade nur mehr durch den Restscherwinkel φ_r beschrieben. Der innere Zusammenhalt wird durch die Auflockerung aufgehoben und die Kohäsion geht gegen null. [4]

2.2.6 Einflussgrößen auf das Spannungs-Verformungs-Verhalten

Die Beziehung zwischen Spannung und Verformung eines Bodens hängt nicht nur von der Art des Bodens ab, sondern auch stark von der Spannungsvorgeschichte, dem aktuellen Spannungsniveau, der Ausnutzung der Scherfestigkeit und der Art der Spannungsänderung. Darüber hinaus sind die Verformungen, welche durch Spannungsänderungen hervorgerufen werden, auch zeitabhängig.

In Bezug auf die Spannungsgeschichte werden Böden in normalkonsolidierte und überkonsolidierte Böden unterteilt. Normalkonsolidierte Böden haben in ihrer Geschichte keine höheren Spannungen als die derzeitige Spannung erfahren. Überkonsolidierte Böden hingegen haben eine Vorkonsolidierungsspannung erlebt, welche beispielsweise durch geologische Vorbelastung hervorgerufen wurde, die wesentlich größer war als die derzeitig aufgebrachte Spannung.

Dieses Konsolidationsverhältnis kann ausgedrückt werden durch die sogenannte Overconsolidation Ratio ($OCR = \text{Vorkonsolidationsspannung} / \text{derzeitige Spannung}$). Diese dient als Maß für die Vorkonsolidierung und ist entscheidend für die Verformungseigenschaften des Bodens. Normalkonsolidierte Böden verhalten sich beispielsweise bei einer Spannungszunahme stets weicher als überkonsolidierte Böden.

Werden an Proben eines nicht verkitteten bindigen Bodens, die bei unterschiedlichen Spannungen konsolidiert sind aber das gleiche Konsolidationsverhältnis OCR aufweisen, Spannungs-Verformungs-Versuche durchgeführt, so sind die auf die Konsolidierungsspannung bezogenen „normierten“ Versuchsergebnisse nahezu identisch.

Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten sollten Versuche zur Beschreibung von Verformungsvorgängen die natürlichen Spannungszustände und die zu erwartenden Spannungsänderungen so genau wie möglich nachbilden. Voraussetzung dafür ist, dass die effektiven Spannungen während der Probenentnahme und dem anschließenden Einbau in das Versuchsgerät unverändert bleiben. Da dies in der Praxis nicht realisierbar ist, müssen bei der Durchführung der Versuche und der Interpretation der Ergebnisse die unvermeidlichen Entnahmestörungen und die Entspannung der Bodenprobe berücksichtigt werden. [5]

3 Triaxialversuch

3.1 Allgemeines zum Triaxialversuch

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, setzt sich die Scherfestigkeit aus der Kohäsion und der Reibungsfestigkeit zusammen. Diese Widerstandskraft eines Bodens kann unter anderem mittels des Triaxialversuches bestimmt werden, indem man eine künstlich erzeugte Spannung auf die Probe aufbringt, und diese Spannung steigert, bis die Probe nachgibt. So können u.a. die Parameter Reibungswinkel φ und Kohäsion c bestimmt werden, welche zur Beurteilung der Tragfähigkeit des untersuchten Bodens herangezogen werden. [4]

Die Geschichte des Triaxialversuches steht in engem Kontakt mit der *Technischen Universität Wien* (früher *Technische Hochschule Wien*). Als *Karl von Terzaghi* in den späten 1920er Jahren an die *Technische Hochschule Wien* berufen wurde, gründete dieser umgehend ein Erdbaulaboratorium, da für ihn praktische Versuche eine große Bedeutung in der Bodenmechanik hatten. Mit diesem Erdbaulabor war *Terzaghi* ein weltweiter Vorreiter und es diente deshalb als Vorbild für ähnliche Labore rund um die Welt. *Karl von Terzaghi* und seine Mitarbeiter entwickelten in dieser Zeit einige grundlegende Versuchsverfahren zur Bestimmung von Bodeneigenschaften, welche bis heute Anwendung finden. Unter anderem wurde 1933 auch der erste Triaxialapparat mit Porenwasserdruckmessung von *Terzaghi* und *Rendulic* entwickelt, welcher in Abb. 3.1 dargestellt ist. [6]

Versuchen mit Konsolidation kann weiters noch zwischen isotroper (CID, CIU) und anisotroper (CAD, CAU) Konsolidation unterschieden werden. [1] Bei unkonsolidierten undrainingen (UU) Versuchen erfolgt lediglich die Phase des Abscherens, wobei mit hoher Vorschubgeschwindigkeit abgesichert wird. Diese Versuche nehmen demnach am wenigsten Zeit in Anspruch und sind in einer eigenen Norm, der ÖNORM EN 17892-8 [2], geregelt. Bei CU- und CD-Versuchen erfolgen Sättigung und Konsolidation immer in gleicher Weise und beim Abscheren wird zwischen geschlossenen (CU) und offenen (CD) Drainagebedingungen unterschieden.

Bei der Durchführung von herkömmlichen Triaxialversuchen werden in der Regel drei voneinander unabhängige Einzelversuche benötigt, um die Scherparameter bestimmen zu können. Dabei wird jeder Einzelversuch mit einem anderen Seitendruck ($\sigma_2 = \sigma_3$) beaufschlagt. Aus den maximal erreichten Spannungen (σ_1) der jeweiligen Versuche mit den zugehörigen Seitendruckstufen ($\sigma_2 = \sigma_3$) lassen sich die *Mohr'schen* Spannungskreise im σ - τ -Diagramm wie in Abb. 3.2 darstellen.

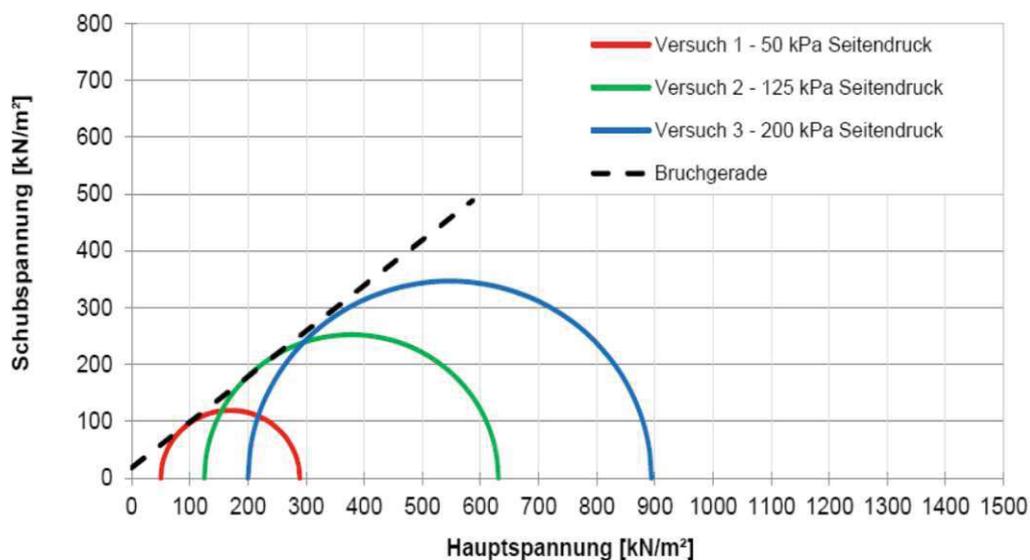


Abb. 3.2: Beispiel für eine Auswertung des Triaxialversuches mittels *Mohr'scher* Spannungskreise

3.2 Anwendung des Versagenskriteriums zur Auswertung des Triaxialversuches

Für die Auswertung der Triaxialversuche in dieser Arbeit wird das *Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium herangezogen.

Dabei können die Ergebnisse nicht nur im σ - τ -Diagramm, sondern auch im sogenannten p-q-Diagramm dargestellt werden, da bei diesem die Darstellung vereinfacht wird. Dabei wird die mittlere Spannung p auf der x-Achse und die Deviatorspannung oder auch der Spannungsdeviator q auf der y-Achse dargestellt, wobei diese Größen folgendermaßen definiert sind:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Diese Definition von p und q gilt für den dreidimensionalen Fall.

Für die Anwendung zur Auswertung von herkömmlichen Triaxialversuchen wird der zweidimensionale Fall benötigt. Bei diesem spricht man vom s-t-Diagramm, wobei s und t folgendermaßen definiert sind:

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Dabei ist s der Mittelpunkt des Spannungskreises (mittlere Spannung) und t ist der Radius des Spannungskreises (Spannungsdeviator).

Im p-q-Diagramm bzw. im s-t-Diagramm wird die Bruchgerade als K_f -Linie (f... failure) bezeichnet. Die Bruchgerade ist dabei folgendermaßen definiert:

$$q_f = b + p_f \cdot \tan \alpha$$

In den folgenden Abbildungen werden auch für den zweidimensionalen Fall die Variablen p und q verwendet.

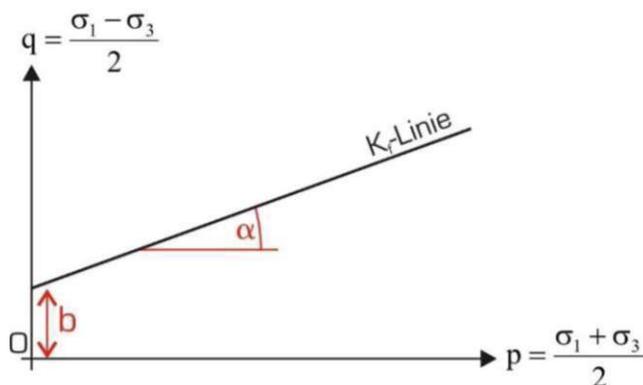


Abb. 3.3: Darstellung des Versagenskriteriums im p-q-Diagramm [4]

Die Variablen b und α lassen sich durch die Parameter c und φ ausdrücken indem p und q in das *Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium eingesetzt werden:

$$q_f = c \cdot \cos \varphi + p_f \cdot \sin \varphi$$

Dabei ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$b = c \cdot \cos \varphi$$

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

Der Spannungsverlauf von Triaxialversuchen kann sowohl in einem σ - τ -Diagramm als auch im p-q-Diagramm dargestellt werden. Um die Vektorkurve für die einzelnen Spannungskreise im σ - τ -Diagramm genau festlegen zu können, benötigt man die Größe des Reibungswinkels. Da dieser im Vorhinein nicht bekannt ist, kann die Darstellung im p-q-Diagramm erfolgen. Dabei verläuft

der Spannungspfad eines drainierten Versuches, wie in Abb. 3.4 dargestellt, geradlinig unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen geneigt. Beim drainierten Versuch ist der Spannungspfad der totalen und der effektiven Spannungen identisch. Die Vektorkurve verläuft in einem Winkel von $45^\circ + \varphi'/2$ zur Waagrechten und ist durch das Spannungspaar σ' und τ definiert. [4]

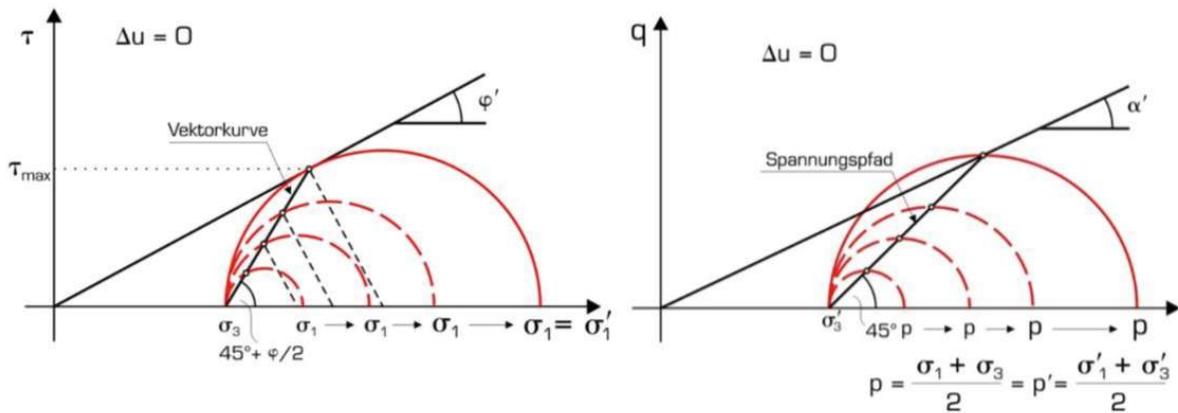


Abb. 3.4: links: Vektorkurve für einen drainierten Triaxialversuch im σ - τ -Diagramm; rechts: Spannungspfad für einen drainierten Triaxialversuch im p - q -Diagramm [4]

Wie in Abb. 3.5 dargestellt, können die effektiven Scherparameter φ' und c' direkt aus der Steigung der Tangente und ihrem Schnittpunkt mit der Ordinate abgeleitet werden. Die *Mohr'schen* Spannungskreise lassen sich auch als Punkte bzw. einzelne Spannungszustände in einem p - q -Diagramm, welches in Abb. 3.6 zu sehen ist, abbilden. Für die Ausgleichsgerade aus Abb. 3.6 werden α' und b' ermittelt, aus denen sich die effektiven Scherparameter wie folgt berechnen lassen: [4]

$$\varphi' = \arcsin \tan \alpha'$$

$$c' = b' / \cos \varphi'$$

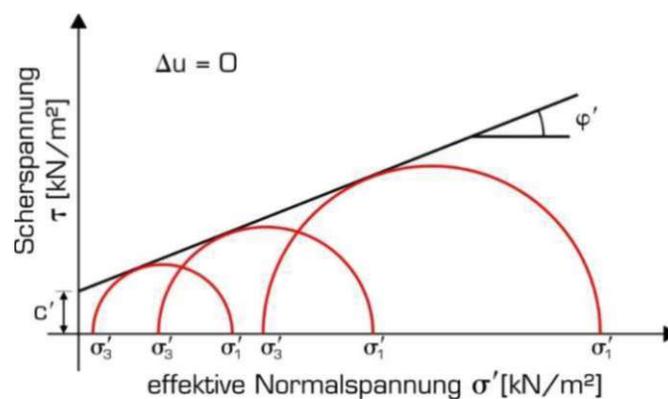


Abb. 3.5: Ermittlung der effektiven Scherparameter beim drainierten Triaxialversuch im σ - τ -Diagramm [4]

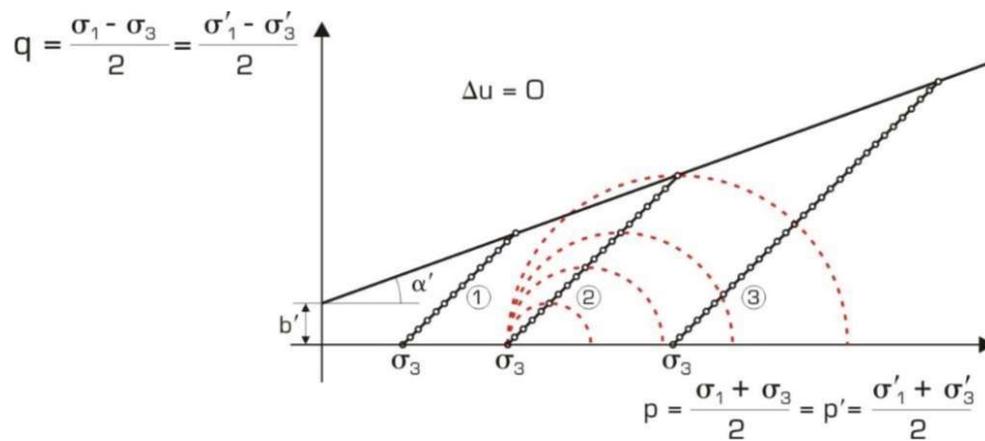


Abb. 3.6: Ermittlung der effektiven Scherparameter beim drainierten Triaxialversuch im p-q-Diagramm [4]

3.3 Prüfanlage

Eine Prüfanlage, welche verwendet wird um Triaxialversuche durchzuführen, ist schematisch in Abb. 3.7 dargestellt.

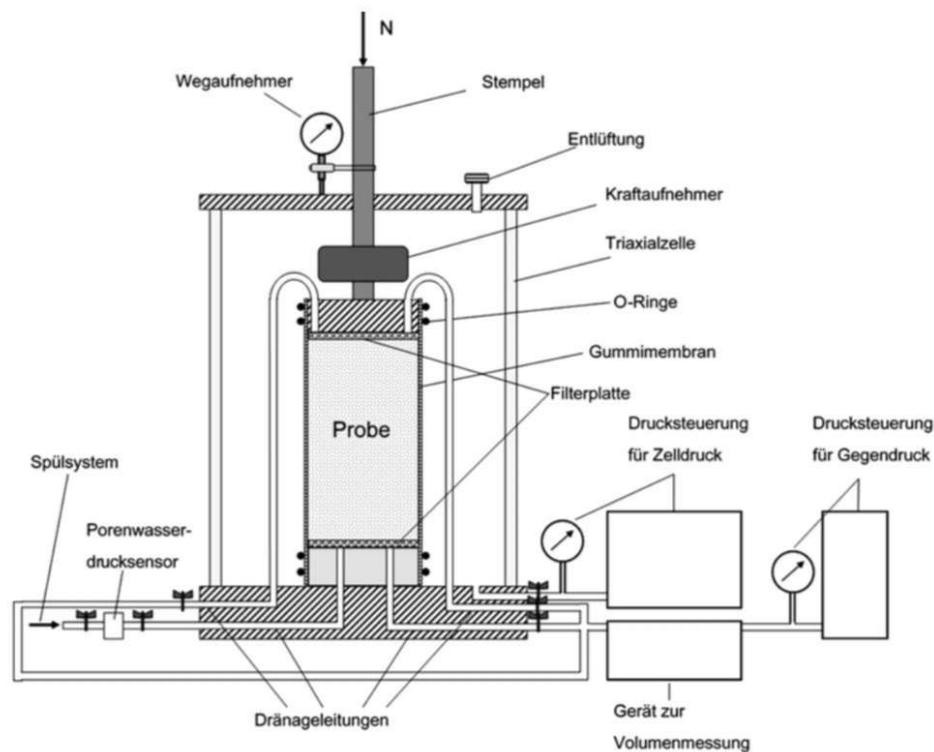


Abb. 3.7: Aufbau einer Triaxialversuchsanlage [7]. Anmerkung: Bei der Prüfanlage im Erdbaulabor der TU Wien befindet sich der Kraftaufnehmer außerhalb der Zelle.

In Abb. 3.7 sind alle wesentlichen Anlagenteile einer Triaxialversuchsanlage abgebildet. Im Erdbaulabor der TU Wien setzt sich die Triaxialversuchsanlage konkret aus folgenden Komponenten der APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH (Wille Geotechnik) zusammen:

- Prüfpresse (Typ UL60)
- Druckerzeuger für den Porenwasserdruck inklusive Volumenmessung der Porenflüssigkeit
- Druckerzeuger für den Zelldruck inklusive Volumenmessung der Zellflüssigkeit
- Triaxialzelle (Bodenaufsätze und Druckköpfe für verschiedene Probendurchmesser)
- Wasser Entgasungsanlage
- Kraftmessdose
- Externer Wegaufnehmer (zusätzlich zu internem Wegaufnehmer der Prüfpresse)
- Externer Porendrucksensor
- PC mit Software GEOsys Classic 9.0.5

Mit dieser Versuchsanlage können verschiedene bodenmechanische Versuche wie beispielsweise Triaxialversuche, einaxiale Druckversuche und Kompressionsversuche durchgeführt werden. Im Erdbaulabor der *TU Wien* werden auf dieser Anlage im Normalfall nur Triaxialversuche durchgeführt. Die Triaxialversuche können je nach Fragestellung mit verschiedenen Randbedingungen durchgeführt werden. Dabei wird unterschieden in isotrop konsolidierte drainierte (CID), isotrop konsolidierte undrainierte (CIU), anisotrop konsolidierte drainierte (CAD), anisotrop konsolidierte undrainierte (CAU) und unkonsolidierte undrainierte (UU) Triaxialversuche. Sämtliche dieser Versuche können mit der Triaxialversuchsanlage des Erdbaulabors der *TU Wien* durchgeführt werden.

Die wichtigsten Anlagenteile werden im folgenden Abschnitt kurz erläutert und abgebildet.

- Prüfpresse (Typ UL60)

Die Prüfpresse vom Typ UL60, welche in Abb. 3.8 dargestellt ist, verwendet ein servopneumatisches Ladesystem für automatische statische und zyklische Lastanforderungen für verschiedene Anwendungen. [8] Die Presse besteht aus einem stabilen Lastrahmen, welcher aus zwei vertikalen Zugstäben und dem Querhaupt aufgebaut ist. Durch die Verschiebung des Querhauptes nach unten oder oben können verschiedene Prüfzellen in die Prüfpresse eingebaut werden. Dadurch können Probekörper mit Durchmessern von 30-150 mm getestet werden. Die Prüfpresse kann manuell mit dem Bedienfeld oder automatisch durch die Software GEOsys gesteuert werden. Die manuelle Steuerung braucht man beispielsweise beim Einbau der Prüfzelle, um den Kontakt zwischen dem Laststempel und dem Prüfrahm zu herstellen. Die Lastaufbringung durch die Presse erfolgt entweder kraftgesteuert oder weggesteuert. In dieser Arbeit wurden weggesteuerte Versuche durchgeführt.

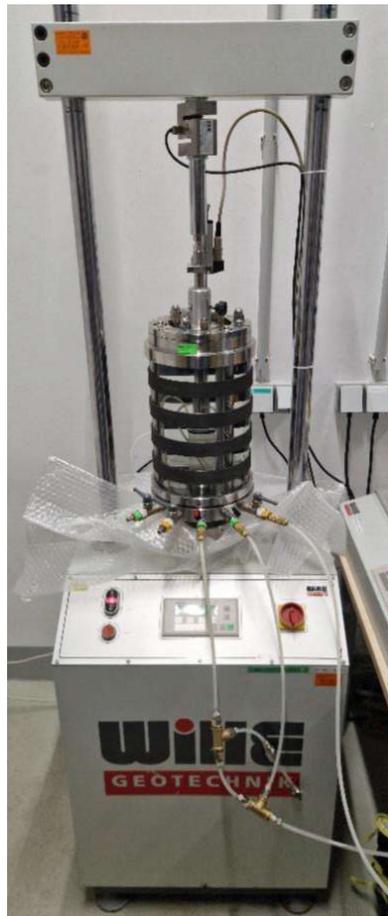


Abb. 3.8: Prüfpresse UL60

- Druckerzeuger für Porenwasserdruck / Zelldruck inkl. Volumenmessung Porenflüssigkeit / Zellflüssigkeit

Die beiden Geräte, welche in Abb. 3.9 dargestellt sind, dienen der Druckerzeugung und Volumenmessung der Zellflüssigkeit sowie der Porenflüssigkeit. Die Druckerzeugung erfolgt durch einen Kolben, welcher durch einen Präzisions-Schrittantrieb im Zylinder bewegt wird. Dabei können verschiedene Flüssigkeiten eingesetzt werden. In dieser Arbeit wurde entlüftetes Wasser verwendet.

Diese Druckerzeuger und Volumenmessgeräte werden in der Software mit VPC bezeichnet. Die Steuerung erfolgt entweder manuell durch das Bedienfeld oder automatisch mittels GEOsys. Die manuelle Steuerung benötigt man beispielsweise zum Auffüllen oder Entleeren der Anlage. Weiters kann durch die manuelle Steuerung auf eine gewünschte Anfangsstellung gefahren werden. [9]



Abb. 3.9: Zeldruckerzeuger und Porenwasserdruckerzeuger

Bevor die VPC-Anlage für den jeweiligen Versuch einsatzbereit ist, muss das gesamte System entlüftet werden. Dies ist notwendig, da sonst komprimierbare Luft im System ist, welche die Messungen verfälscht und den Druckaufbau beeinträchtigt. Um die Entlüftung zu bewerkstelligen, werden die beiden Schläuche der VPC-Anlagen mit der Triaxialzelle verbunden und die Ventile geöffnet. Anschließend werden die Entlüftungsschrauben an den VPC-Anlagen geöffnet, sodass Wasser und die in den Schläuchen vorhandene Luft entweichen können. Sind die Schläuche vollständig mit Wasser gefüllt, so kann die jeweilige Entlüftungsschraube wieder geschlossen werden. Dieser Vorgang wird parallel zum Befüllen der Triaxialzelle durchgeführt.

- Triaxialzelle inklusive Bodenaufsätze und Druckköpfe

Eine vollständige und eingebaute Triaxialzelle, welche im Erdbaulabor der *TU Wien* verwendet wird, ist in Abb. 3.11 dargestellt. Das Gerüst einer Triaxialzelle, welches in Abb. 3.10 dargestellt ist, besteht aus einer massiven Bodenplatte, mit welcher drei senkrechte Stützen verschraubt sind. Am oberen Ende befindet sich wieder eine massive Platte, durch welche der Druckstempel zentral durchgeführt wird. Die Außenhülle der Triaxialzelle besteht aus der aufgesetzten Zellwand, welche aus einem mit GFK verstärkten Klarsichtzylinder aufgebaut ist.

Auf der rechten Seite in Abb. 3.10 ist der Sockel sowie der Bodenaufsatz, in diesem Fall für Probekörper mit 70 mm Durchmesser, abgebildet. Diese beiden Teile sind mit der Bodenplatte verschraubt. Links in Abb. 3.10 sind der Sockel sowie der Bodenaufsatz in eingebautem Zustand zu sehen. Auf dem Bodenaufsatz befindet sich ein Filterstein, welcher verhindern soll, dass die Drainagebohrungen verlegt werden. Auf dem Filterstein befindet sich noch ein Filterpapier und anschließend ist der Probekörper angeordnet. Am oberen Ende des Probekörpers ist wieder ein Filterpapier und ein Filterstein angeordnet und darüber befindet sich der Druckkopf, welcher ebenfalls mit Drainagebohrungen ausgestattet ist. Auf den Druckkopf wird beim Einbau der Druckstempel angesetzt. Der Druckstempel ist im eingebauten Zustand fest mit dem Rahmen der UL60 verbunden und die gesamte Triaxialzelle wird durch die Prüfpresse UL60 von unten nach oben gedrückt. Dadurch wird der Probekörper axial belastet.

Der Probekörper ist mit einer Latexhülle überzogen, um ein Eindringen der Zellflüssigkeit zu verhindern. Der Druckkopf, sowie der Bodenaufsatz müssen in die Latexhülle eingefädelt und mit O-Ringen aus Gummi abgedichtet werden, um ein getrenntes System des Porenwasserdruckes und des Zelldruckes zu schaffen.

Außen an der Prüfzelle befinden sich fünf Ventile. Drei davon dienen der Aufbringung des Porenwasserdruckes bzw. der Drainage von Porenwasser und zwei davon dienen der Aufbringung des Zelldruckes. Das Ventil, welches ganz links in der Abb. 3.10 dargestellt ist, ist mit der linken Drainageöffnung des Druckkopfes verbunden und dient so der Aufbringung des Porenwasserdruckes an der Oberseite des Prüfkörpers. Das zweite Ventil von links ist mit der nächstgelegenen Drainagebohrung in der Bodenplatte verbunden und dient der Aufbringung des Zelldruckes. Das mittlere Ventil ist mit den Drainagebohrungen am Bodenaufsatz verbunden und dient so der Aufbringung des Porenwasserdruckes an der Unterseite des Prüfkörpers. Das zweite Ventil von rechts ist mit der rechten Bohrung am Druckkopf verbunden und dient wiederum der Aufbringung von Porenwasserdruck an der Oberseite des Prüfkörpers. Das Ventil auf der rechten Seite ist mit einer Bohrung an der Bodenplatte verbunden und dient dem Zelldruck. Auf der Rückseite der Triaxialzelle befindet sich noch ein Ventil, an welches der externe Porendrucksensor angeschlossen ist, der den Druck an der Unterseite des Prüfkörpers misst. Weiters befinden sich an der oberen Platte des Triaxialrahmens noch drei Auslassventile, welche beim Befüllvorgang der Triaxialzelle dem Entweichen der Luft dienen.

Auf der Bodenplatte und der Kopfplatte sind Dichtungsringe angeordnet, welche mit Silikonfett eingeschmiert werden, um das Aufsetzen der Zellwand zu erleichtern und die Dichtheit zwischen Rahmen und Zellwand zu verbessern.

Wie in Abb. 3.11 dargestellt, werden die vorderen Auslässe mit sogenannten Schnellkuppelventilen an den Porendruckerzeuger und den Zelldruckerzeuger angeschlossen.



Abb. 3.10: links: Triaxial-Rahmen mit Probe nach dem Versuch; rechts: Sockel und Bodenaufsatz mit Drainagebohrungen



Abb. 3.11: vollständig eingebaute Triaxialzelle

- Wasser Entgasungsanlage

Die Wasser Entgasungsanlage, welche in Abb. 3.12 dargestellt ist, dient dem Entfernen der Luft aus dem Leitungswasser. Dies ist notwendig, damit das gesamte System möglichst frei von Luftblasen ist.

Die Wasser Entgasungsanlage wird befüllt, indem zuerst ein Unterdruck in der Anlage aufgebaut wird (etwa 0,8 bar) und anschließend aus einem Tank, welcher zuvor mit Leitungswasser befüllt wurde, Wasser angesaugt wird. Die Befüllung erfolgt bis zu der grünen Markierung. Die Wasser Entgasungsanlage ist in einer Höhe von etwa 1,80 m angebracht. Durch die Höhendifferenz zwischen Entgasungsanlage und den anderen Komponenten der Triaxialversuchsanlage können sämtliche Befüll- und Entlüftungsvorgänge rein durch den hydraulischen Druckgradienten bewerkstelligt werden.



Abb. 3.12: Wasser Entgasungsanlage

- Kraftmessdose

Die Kraftmessdose, welche in Abb. 3.13 dargestellt ist, ist fix mit dem Lastrahmen verbunden und befindet sich somit außerhalb der Zelle. Die Kraftmessdose ist ebenfalls vom Hersteller *Wille Geotechnik* und es können Kräfte bis zu 60 kN gemessen werden.



Abb. 3.13: Kraftmessdose

- Externer Wegaufnehmer

Der externe Wegaufnehmer ist in Abb. 3.14 dargestellt. Dieser ist mit dem Druckstempel, welcher mit zunehmender Axialverformung weiter in die Zelle eingeschoben wird, verschraubt und misst so die Differenzverformung zwischen Zelle und Druckstempel. Der externe Wegaufnehmer dient neben dem internen Wegaufnehmer, welcher in der Prüfpresse liegt, der Kontrolle der Vertikalverformung. Außerdem ist dieser feiner aufgelöst als der interne Wegaufnehmer.

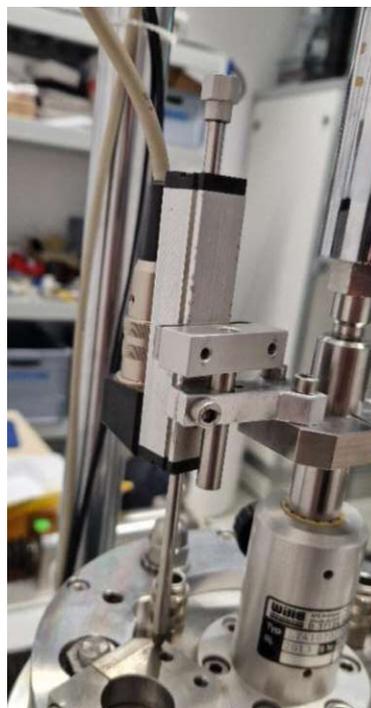


Abb. 3.14: externer Wegaufnehmer

- Externer Porendrucksensor

In Abb. 3.15 ist der externe Porendrucksensor dargestellt. Dieser ist an der Rückseite der Bodenplatte mittels eines Schnellkuppelventiles mit einer Drainagebohrung am Bodenaufsatz und somit mit dem Porenwasserdrucksystem verbunden. Der Porendrucksensor kann zur Messung von Wasserdrücken zwischen 0 und 10 bar eingesetzt werden. [9]

Bei undrainierten Triaxialversuchen muss der externe Porendrucksensor angebracht werden, um die effektiven Spannungen berechnen zu können. Bei drainierten Versuchen dient dieser der Kontrolle des Porenwasserdruckes und der Entlüftung des unteren PorenwasserSystems im Bodenaufsatz. Dabei wird Wasser durch das vordere Ventil, welches mit dem Bodenaufsatz verbunden ist, eingedrückt. Anschließend wird das Schraubventil des externen Porendrucksensors etwas geöffnet, sodass die vorhandene Luft im Bodenaufsatz und in den Leitungen entweichen kann. Dies wird durchgeführt bis ausschließlich Wasser aus der Entlüftungsleitung entweicht.



Abb. 3.15: externer Porendrucksensor

3.4 Probenherstellung und Einbau in die Triaxialversuchsanlage

Kommen die Bodenproben von der Baustelle ins Labor, müssen diese noch für die jeweiligen Laborversuche vorbereitet werden.

Bei den Bodenproben wird zwischen ungestörten und gestörten sowie aufbereiteten Proben unterschieden. Bei der Untersuchung von ungestörten Bodenproben ist darauf zu achten, dass diese ab Entnahme auf der Baustelle möglichst luftdicht verpackt werden und keine Störungen erfahren. Diese Proben haben hohe Anforderungen an die Bewahrungstechnik, denn es sollen die tatsächlichen Feldbedingungen in Bezug auf Wassergehalt, Spannungsverhältnisse, Temperatur, Dichte etc. repräsentiert werden. Aufbereitete Bodenproben, welche in dieser Arbeit zur Anwendung kamen, werden im Labor getrocknet, bei Bedarf gebrochen und anschließend wird mit vordefiniertem Wassergehalt und vordefinierter Verdichtungsenergie ein für den jeweiligen Versuch passender Probekörper hergestellt. Laut EN ISO 17892-9 [1] ist dabei darauf zu achten, dass dem aufbereiteten Bodenmaterial nach Wasserzugabe mindestens 16 Stunden Zeit gegeben wird, damit sich das Wasser gleichmäßig verteilt bevor mit der lagenweisen Verdichtung begonnen wird. Wie in Abb. 3.16 zu sehen, erfolgt die Verdichtung der Probekörper beispielsweise mit dem leichten Proctorhammer in einer teilbaren zylinderförmigen Probenform.



Abb. 3.16: Beispiel einer Methode zur Verdichtung von aufbereiteten Probekörpern

Von dem hergestellten Probekörper werden im Anschluss Höhe, Durchmesser sowie die Masse gemäß ÖNORM EN ISO 17892-2 [10] ermittelt, um weiters das Volumen sowie die Feuchtdichte des Probekörpers bestimmen zu können.

Im nächsten Schritt wird die Probe für den Einbau in die Triaxialversuchsanlage vorbereitet. Auf den Probekörper wird eine Latexhülle mittels einer Einbauhilfe, welche in Abb. 3.17 dargestellt ist, aufgezogen, um ein Eindringen der Zellflüssigkeit in die Probe zu verhindern. Dabei wird die Latexhülle durch Aufbringen eines geringen Unterdruckes, welcher mittels eines Sogs an dem Schlauch aufgebracht wird, an den Metallzylinder angelegt und kann so über die Probe geschoben werden. Die Latexhülle sollte im feuchten Zustand laut ÖNORM EN 17892-8 [1] einen Durchmesser von 95-100% des Probedurchmessers haben sowie eine Stärke von maximal 1% des Probedurchmessers aufweisen. Für die Proben mit 100 mm Durchmesser wurden demnach 100 mm Hüllen mit einer Stärke von 0,5-1,0 mm, je nachdem wie kantig die Probe war, herangezogen. Für die 70 mm und 40 mm Proben wurden nach selbiger Systematik 70 mm und 40 mm Hüllen mit 0,5 mm bzw. 0,3 mm Stärke herangezogen. Bevor die Einbauhilfe entfernt wird und sich die Latexhülle eng an die Probe anlegt, müssen noch Filterpapier sowie Filterplatten an beiden Stirnseiten der Probe angelegt werden.



Abb. 3.17: Einbauhilfe Latexhülle

Nachdem die Probe fertig vorbereitet ist, wird sie in den Triaxialrahmen eingebaut. An den Stirnseiten befinden sich die Filterplatten, durch welche während der Sättigung Wasser in die Probe eingedrückt wird und während der Konsolidation und dem Abscheren Wasser aus der Probe in die Drainageöffnungen am Druckkopf sowie am Boden über den Sockel abfließen kann. Dieser Druckkopf und der Sockel müssen noch in die Latexhülle eingefädelt und mittels O-Ringen abgedichtet werden. Anschließend werden die Drainageschläuche des Druckkopfes mit den Auslassventilen verbunden.

Bevor die Zellwand auf den Triaxialrahmen aufgesetzt wird, werden die Dichtungsringe mit etwas Silikonfett eingeschmiert, um ein besseres Aufsetzen sowie bessere Dichtheit zu ermöglichen. Anschließend wird die Zellwand aufgesetzt und mit drei Sechskantmuttern fest verschraubt. Die fertig verschraubte Triaxialzelle ist in Abb. 3.18 dargestellt.

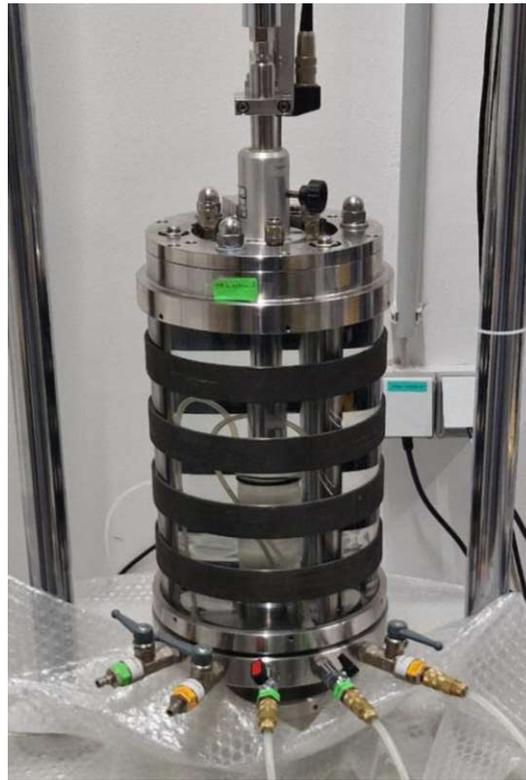


Abb. 3.18: fertige Triaxialzelle in UL 60 eingebaut

Nun kann die fertig vorbereitete Zelle in die Prüfpresse eingebaut und über die Ventile mit Wasser aus der Entgasungsanlage befüllt werden. Dabei müssen an den oberen drei Entlüftungen Schläuche angeschlossen werden, um ein Entweichen der in der Zelle befindlichen Luft zu ermöglichen. Während des Befüllvorganges werden die Schläuche des Zelldruckerzeuger und des Porenwasserdruckerzeuger an die Zelle angeschlossen. Weiters werden der externe Porenwasserdrucksensor sowie der externe Wegaufnehmer an der Zelle angebracht. Nachdem sämtliche Geräte angeschlossen sind, muss das gesamte System entlüftet werden. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, wird manuell der Kontakt zwischen Prüfpresse und Stempel hergestellt und die Fixierung des Stempels gelöst. Anschließend werden Prüfpresse, Zelldruckerzeuger, Porenwasserdruckerzeuger, Wegaufnehmer und Porendrucksensor mit dem Computer bzw. mit GEOSys verbunden und der jeweilige Versuch gestartet.

3.5 Ablauf eines Triaxialversuches

Ist die Probe wie in Kapitel 3.4 beschrieben eingebaut, so kann mit dem Versuch begonnen werden. Nachdem der Vertikalkraftstempel den Probenkontakt hergestellt hat, wird der Sättigungsvorgang eingeleitet. Dabei wird der Porenwasserdruck („backpressure“) meist stufenweise gesteigert, bis die Probe gesättigt ist. Mit der Steigerung des Porenwasserdrucks muss auch der Zelldruck \equiv Seitendruck in gleichem Ausmaß gesteigert werden, sodass die effektiven Spannungen ($\sigma' = \sigma - u$) gleich null bleiben.

Ob eine ausreichende Sättigung erfolgt ist, wird mit dem B-Test überprüft. Dabei wird der Zelldruck bei geschlossenen Drainageleitungen um $\Delta\sigma$ erhöht und man überprüft mittels Messung des Porenwasserdruckes, ob dieser um denselben Betrag $\Delta\sigma$ ansteigt. Ist dies nicht der Fall, wird

die Sättigung fortgesetzt bis der B-Test erfüllt ist. Gemäß EN ISO 17892-9 [1] gilt der B-Test als erfüllt, wenn der Wert 0,95 erreicht bzw. überschritten wird.

Im nächsten Schritt wird der Konsolidationsvorgang begonnen. Dabei wird bei geöffnetem Drainagesystem der zuvor definierte effektive Seitendruck aufgebracht. In dieser Phase wird der Probekörper konsolidiert, was bedeutet, dass Porenwasser ausgedrückt wird. Laut EN ISO 17892-9 [1] kann der Konsolidationsvorgang als abgeschlossen angesehen werden, wenn die Volumenänderung je Stunde weniger als 0,1% des Probekörpervolumens oder weniger als $0,1 \text{ cm}^3/\text{h}$ beträgt.

Nach Abschluss der Konsolidation wird der Abschervvorgang gestartet. Je nachdem ob ein undrainierter oder drainierter Versuch durchgeführt wird, müssen die Drainageventile sowie die Abschergeschwindigkeit angepasst werden. Die Abschergeschwindigkeit ist laut EN ISO 17892-9 [1] in Abhängigkeit von der Konsolidationsdauer zu berechnen, da dadurch die Porenwasserdrücke beeinflusst werden können. Der Versuch gilt als beendet, wenn entweder 15% Axialdehnung überschritten ist oder der Wert der aktuellen Deviatorspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$) den Höhepunkt der Deviatorspannung um 20% unterschreitet.

Zuletzt wird die Probe aus dem Versuchsapparat ausgebaut, dokumentiert, abgewogen und der Wassergehalt sowie die Dichte bestimmt. Wie in Abb. 3.19 dargestellt, sind Bruchformen beim Triaxialversuch je nach Korngrößenverteilung sowie Lagerungsdichte verschieden ausgebildet.

Die Auswertung von Triaxialversuchen wird in Kapitel 3.7.6 sowie Kapitel 4.7 beschrieben.



Abb. 3.19: Bruchformen von Triaxialversuchen; links: feinkörnige Probe mit Ausbauchung; rechts: gut gestufte grobkörnige Probe mit markanter Scherfuge

3.6 Österreichische Normen für Triaxialversuche

Für Triaxialversuche gibt es in Österreich im Wesentlichen zwei relevante Regelwerke, welche sich in der Art der Durchführung des Versuches unterscheiden.

Die ÖNORM EN ISO 17892-8 [2] regelt die Anforderungen, um einen unkonsolidierten undrainierten Triaxialversuch (UU-Versuch) durchführen zu können. Dabei werden sämtliche

Anforderungen an die Versuchsapparatur, die Messgeräte und die Hilfsgeräte definiert. Weiters wird die Herstellung der Probekörper und der anschließende Versuchsablauf geregelt. Folgend sind die Auswertung der Ergebnisse und Regeln zum Verfassen des Versuchsberichtes angegeben.

Die ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] regelt die Anforderungen, um einen konsolidierten Triaxialversuch (CU-Versuch, CD-Versuch) durchführen zu können. Dabei werden sämtliche Anforderungen an die Versuchsapparatur, die Messgeräte und die Hilfsgeräte definiert. Weiters wird die Herstellung der Probekörper und der anschließende Versuchsablauf geregelt. Folgend sind die Auswertung der Ergebnisse und Regeln zum Verfassen des Versuchsberichtes angegeben.

In der gegenständlichen Arbeit wurde die Prüfvorschrift, wie auch die Auswertung der Versuche entsprechend dieser Normen ausgearbeitet.

3.7 Erläuterung des Prüfablaufes anhand der Prüfvorschrift

3.7.1 Allgemeines zur Prüfvorschrift

Die Prüfvorschrift ist ein Befehlsablauf, welcher in GEOsys programmiert wird. Die Prüfvorschrift koordiniert die einzelnen Geräte der Prüfmaschine und dient so der automatisierten Steuerung des Triaxialversuches.

Für den herkömmlichen Triaxialversuch gab es bereits zu Beginn der Arbeit eine Prüfvorschrift der Firma *Wille Geotechnik*. Diese wurde im Zuge der Erstellung der Prüfvorschrift für den mehrstufigen Triaxialversuch ebenfalls überarbeitet.

Der Aufbau der Prüfvorschrift erfolgt mit sogenannten Knoten. Dabei gibt es neun verschiedene Knotentypen, welche entweder untereinander auf gleicher Hierarchieebene und somit unabhängig voneinander wirken oder ineinander auf untergestellten Hierarchieebenen angeordnet werden und somit verknüpft wirken. Die speziellen Eigenschaften und Funktionen der Knotentypen wurden anhand des GEOsys Benutzerhandbuches erlernt. So konnte in einem Trial-and-Error Prozess die bestehende Prüfvorschrift verbessert, sowie der mehrstufige Prüfablauf, welcher in Kapitel 4.6 erläutert wird, in die Prüfvorschrift etabliert werden.

Bezüglich der Begrifflichkeiten ist anzumerken, dass der Porenwasserdruck in der Prüfvorschrift mit Porendruck bezeichnet wurde.

3.7.2 Initialbedingungen

Die Initialbedingungen dienen dem Tarieren der Weg- und Volumenmessgeräte, sowie dem Herstellen von einem geringen Anfangs-Spannungsniveau der Vertikalspannung, des Zeldruckes und des Porendruckes.

Wie in Abb. 3.20 ersichtlich, beginnt die Prüfvorschrift mit dem Anlegen einer neuen Datei. Dem Dateiknoten müssen sämtliche weitere Knoten unterstellt werden. Als nächstes wird ein Sequenzknoten eingefügt. Dieser beinhaltet lediglich die Funktion, dass ihm unterstellte Knoten der Reihe nach ausgeführt werden. In dem Fall von Abb. 3.20 sind ein Meldungsknoten und vier Kommandoknoten unterstellt, welche der Reihe nach ausgeführt werden.

Der erste Knoten gibt die Meldung aus, dass das gesamte System entlüftet sein muss. Ist dies gegeben, sollen die Ventile zu Porendruckerzeuger und Zellendruckerzeuger langsam geöffnet werden. Bestätigt man die Meldung, wird der nächste Knoten ausgeführt. Dieser ist ein Kommandoknoten, der den internen Wegaufnehmer, welcher als Vertikaler Weg bezeichnet ist, auf null setzt. Nachdem dieser Befehl ausgeführt wird, springt GEOsys automatisch zum nächsten

Kommandoknoten, welcher wieder lediglich den Externen Weg auf null setzt. Die weiteren zwei Kommandoknoten setzen die Volumenmessung der Zelle sowie die Volumenmessung der Porenflüssigkeit auf null.

Die nächsten beiden Knoten sind Parametermengen. In diesen werden die Werte für die Differenz zwischen Porendruck und Zelldruck (offset), die Initial-Zelldruckspannung sowie die allgemeine Spannungsrate [kPa/min] definiert. Dem nächsten Sequenzknoten ist ein Knoten vom Typ Datentabelle untergeordnet, welcher mit einer Aufzeichnungsbedingung (L) versehen ist. Dieser Knotentyp dient dazu, definierte Werte in ein Textfile zu schreiben, bis sämtliche seiner Unterknoten ausgeführt sind. Die Aufzeichnungsrate wird in der Aufzeichnungsbedingung festgelegt (z.B. alle 30 sec). Für jeden Versuchsschritt wird ein eigenes Textfile angelegt, welches im Nachhinein für die Auswertung herangezogen wird.

Dem nächsten Sequenzknoten sind wieder vier Kommandoknoten untergeordnet, welche verschiedene Funktionen übernehmen. Der erste Knoten gibt die Aufforderung, dass die Ventile zu Zelldruck und Porendruck geöffnet sein müssen. Der zweite Knoten bewegt den Druckstempel mit der in der Parametermenge definierten Geschwindigkeit Richtung Probekörper, bis eine Kontaktspannung von 10 kPa erreicht ist. Der dritte Knoten gibt dem Porendruckerzeuger den Befehl „Halten“, während der vierte Knoten den Zelldruck auf den Wert des gehaltenen Porendruckes + offset stellt.

Zum Abschluss der Initialbedingungen ist noch ein Verzweigungsknoten mit zwei Unterknoten angeordnet. Der Verzweigungsknoten hat die Funktion, dass seine Unterknoten gleichzeitig ausgeführt werden, wobei definiert werden kann, ob der Verzweigungsknoten beendet wird, wenn alle seine Unterknoten abgeschlossen sind oder wenn nur einer seiner Unterknoten abgeschlossen ist. Im Fall von Abb. 3.20 wird definiert, dass alle Unterknoten beendet werden müssen. In diesem Fall sind dies die beiden Kommandoknoten, welche zum einen den Zelldruck auf die Initialspannung von 30 kPa erhöhen und zum anderen den Porendruck auf den Wert Zelldruck - offset setzen, was hier 20 kPa entspricht.

Knotentyp - Ziel	Bedingungen	Kommentar
1 Datei	(WBL)	
1 Sequenz		
1 Meldung		
2 Kommando - Vertikaler Weg		
3 Kommando - Externer Weg		
4 Kommando - Volumensänderung Zelle		
5 Kommando - Porenvolumen		
2 Parametermenge		
3 Parametermenge	(WBL)	
1 Sequenz	(L)	
1 Datentabelle	L	Initial-Bedingungen
1 Sequenz		
1 Kommando - Drainageventil		
2 Kommando - Vertikaler Weg		
3 Kommando - Porendruck gesteuert		
4 Kommando - Zelldruck total		
5 Verzweigung		
1 Kommando - Zelldruck total		
2 Kommando - Porendruck gesteuert		

Abb. 3.20: Prüfvorschrift Initialbedingungen [Wille Geotechnik, adaptiert]

3.7.3 Sättigung

Ziel der Sättigung ist es, dass sämtliche Poren im Probekörper, sowie die Filtersteine und Drainageleitungen mit entlüftetem Wasser gefüllt sind. Dies ist notwendig, um bei der Auswertung der Triaxialversuche mit effektiven Spannungen ($\sigma' = \sigma - u$) rechnen zu können und weiters um die Volumenänderung, welche über ausgedrücktes Wasser erfolgt, richtig messen zu können.

Die Sättigung erfolgt mit dem sogenannten „backpressure“ Verfahren welches in der ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] definiert ist. Dabei wird der Porendruck meist schrittweise erhöht, indem über die Drainageleitung am Druckkopf und über die Drainageleitung am Sockel beidseitig Druck aufgebracht wird. Durch den Druck an beiden Stirnseiten der Probe soll der Porendruck so stark erhöht werden, dass sich die geringen Luftmengen, welche sich in der Probe befinden im Wasser auflösen und so vollständige Sättigung erreicht wird. Dieser Vorgang basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass bei steigendem Druck auch das Luftvolumen, welches in Wasser gelöst werden kann, steigt (siehe Abb. 3.21).

Bei Erhöhung des Porendruckes muss gleichzeitig auch der Zelldruck um denselben Betrag erhöht werden, damit die effektiven Spannungen nicht verändert werden und damit ein Aufblähen der Latexhülle verhindert wird.

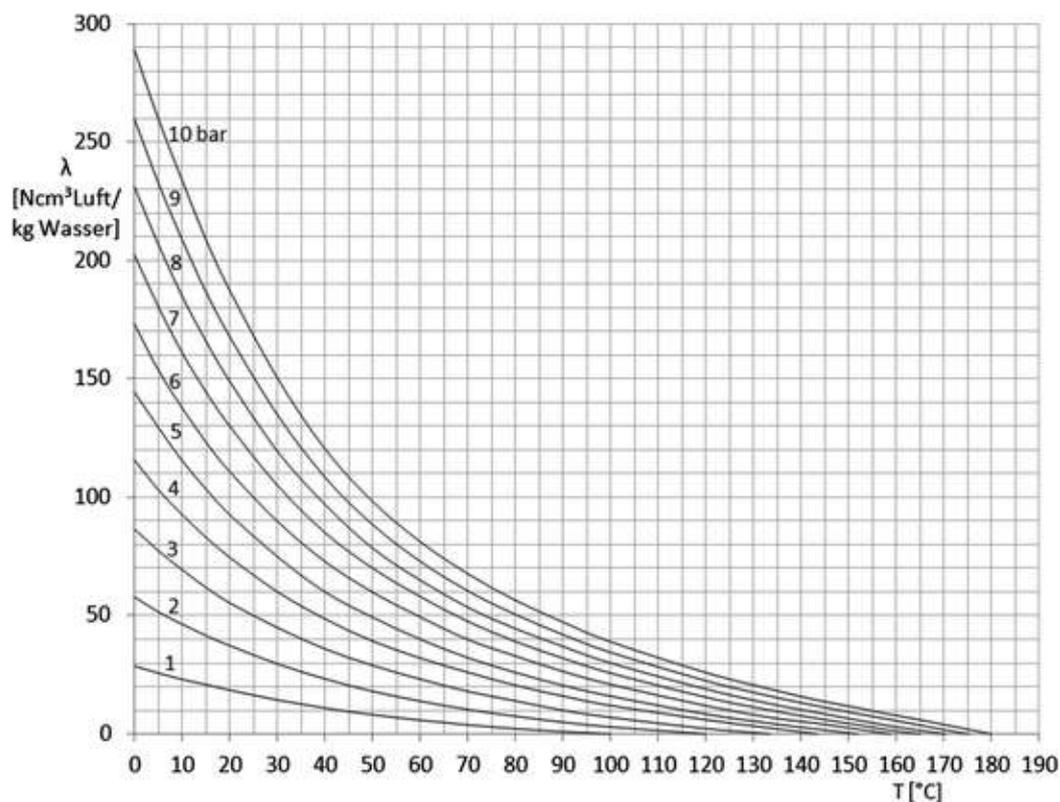


Abb. 3.21: Lösung von Luft im Wasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur [11]

In der Prüfvorschrift wird der beschriebene Sättigungsvorgang, wie in Abb. 3.22 dargestellt, realisiert.

Der erste Knoten ist ein Schleifen-Knoten. Dieser hat die Funktion immer wieder ausgeführt zu werden, bis ein bestimmtes Kriterium erfüllt ist. Die erste Schleife steht in diesem Fall über den Versuchsabschnitten Sättigung, B-Test, Konsolidation und Abscheren. In Kombination mit der

darunter stehenden Parametermenge, in welcher die Versuchsabschnitte definiert sind, bietet diese Schleife ein Auswahlmenü, in welchem man auswählen kann zu welchem Versuchsabschnitt man springen möchte. Wählt man Sättigung, so gelangt man in die zweite Schleife, welche in Abb. 3.22 zu sehen ist. Diese Schleife wird nun ausgeführt, bis sämtliche ihrer Unterknoten abgeschlossen sind. Danach gelangt man wieder in das übergeordnete Auswahlmenü und kann zum nächsten Versuchsabschnitt springen.

Im ersten Kommando des Sättigungsvorganges wird nochmal angezeigt, dass die Ventile zu Zelldruck und Porendruck geöffnet sein müssen. Im nächsten Parametermenge-Knoten ist der Sättigungsdruck (in etwa 300-700 kPa) sowie dessen Spannungsrate definiert. Darunter ist wieder eine Datentabelle eingefügt, welche ein eigenes Textfile für den Sättigungsvorgang anlegt. Der Datentabelle untergeordnet befindet sich ein Verzweigungs-Knoten. Dieser hat wiederum die Funktion, dass die beiden untergeordneten Kommando-Knoten gleichzeitig ausgeführt werden. Die beiden Kommando-Knoten erhöhen gleichzeitig und mit derselben Spannungsrate den Zellen- und den Porendruck. Der Porendruck wird dabei auf den in der Parametermenge definierten Wert des Sättigungsdruckes erhöht und der Zellen- und den Porendruck auf Sättigungsdruck + offset.

Sobald der Porendruck und der Zelldruck ihren Zielwert erreicht haben, wird der Meldungsknoten aktiviert. Dieser gibt die Meldung aus, dass die Sättigung im Gange ist. Klickt man bei der Meldung auf „weiter“, so wird der Sättigungsvorgang abgebrochen und man gelangt wieder in das übergeordnete Auswahlmenü der Versuchsabschnitte.

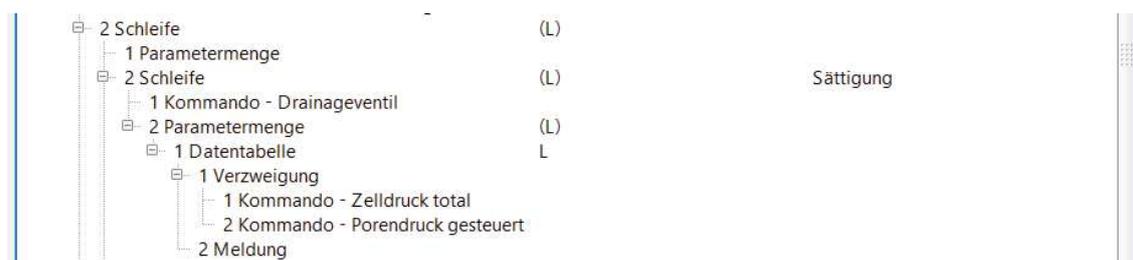


Abb. 3.22: Prüfvorschrift Sättigung [Wille Geotechnik, adaptiert]

3.7.4 B-Test

Der Sättigungsvorgang wird unterbrochen, wenn ausreichende Sättigung vermutet wird. Die Sättigung muss durch einen sogenannten B-Test überprüft werden. Dabei werden die beiden Ventile, an welchen der Porendruckerzeuger angeschlossen ist, langsam geschlossen, sodass keine Drainage der Porenflüssigkeit möglich ist. Anschließend wird der Zelldruck um ein Spannungsincrement $\Delta\sigma$, welches zwischen 10-100 kPa gewählt werden sollte, erhöht. Mit der Erhöhung des Zelldruckes muss bei vollständiger Sättigung auch der Porendruck um denselben Betrag ansteigen. Die Änderung des Porendruckes wird mit dem externen Porendrucksensor gemessen und anschließend kann der B-Wert mit folgender Formel berechnet werden:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$$

Nachdem der Zelldruck seinen Zielwert erreicht hat, lässt man dem System etwa fünf Minuten Zeit, bis der B-Wert endgültig berechnet wird. Überschreitet dieser berechnete B-Wert den Wert 0,95 darf die Sättigung laut ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] als abgeschlossen angesehen werden.

Ergibt sich ein geringerer Wert, so muss der Sättigungsvorgang fortgesetzt werden, wobei meist auch eine Erhöhung des Sättigungsdruckes durchgeführt wird. Nach dem weiteren Sättigungsvorgang wird der B-Test wiederholt. Dieser Vorgang wird so lange durchgeführt, bis eine ausreichende Sättigung erreicht ist. Sollte die ausreichende Sättigung nicht erreicht werden, muss im Bericht festgehalten werden, dass der Sättigungsvorgang nicht vollständig durchgeführt werden konnte.

Der beschriebene Vorgang des B-Tests wird in der Prüfvorschrift, wie in Abb. 3.23 zu sehen, realisiert. Zu Beginn steht wieder eine Schleife, welche dazu dient, dass der Versuchsabschnitt B-Test zu laufen beginnt, wenn man diesen im Auswahlménü der darüberstehenden Schleife auswählt. Der nächste Knoten ist ein Kommando-Knoten, welcher den Benutzer dazu aufruft, die Ventile des Porendrucksystems zu schließen. Die Parametermenge dient dazu, den Wert $\Delta\sigma$, die Spannungsrate sowie die Aufzeichnungsrate der Daten zu definieren. Der Parametermenge untergeordnet ist eine Datentabelle eingefügt, welche wiederum ein eigenes Textfile für den B-Test anlegt.

Der nächste untergeordnete Knoten ist vom Typ lokale Kanäle. Dieser Knotentyp ist ähnlich zur Parametermenge, jedoch werden darin nicht Werte definiert, sondern Berechnungsformeln, welche nur für einen bestimmten Abschnitt benötigt werden. Darin ist beispielsweise die Berechnungsformel für den B-Wert definiert.

Unter den lokalen Kanälen wird nun der eigentliche B-Test ausgeführt. Das erste Kommando erhöht den aktuell vorliegenden Zelldruck um $\Delta\sigma$. Sobald der Zelldruck seinen Zielwert erreicht hat, wird im nächsten Kommando sofort der B-Wert₁ berechnet und ausgegeben. Dieser liegt meist noch unter dem Zielwert von 0,95, da der Porendruck etwas Zeit benötigt, um sich einzustellen. Der nächste Knoten gibt die Meldung aus, dass etwa fünf Minuten gewartet werden soll, bis „weiter“ geklickt wird. Wird die Meldung schließlich ausgeführt, wird im nächsten Kommando der B-Wert₂ berechnet und ausgegeben.

Je nachdem ob der B-Wert₂ den Wert 0,95 überschreitet oder nicht wird anschließend die Schleife 2 oder die Schleife 3 automatisch ausgeführt. Schleife 2 wird ausgeführt, wenn der Wert 0,95 unterschritten wird. In diesem Fall wird die Meldung ausgegeben, dass der B-Wert nicht erreicht wurde und der B-Test abgebrochen wird. Im Fall der Überschreitung von 0,95 wird die Schleife 3 ausgeführt, wobei die Meldung ausgegeben wird, dass der B-Wert erreicht wurde und der Test abgebrochen wird.

In beiden Fällen wird im nächsten Schritt Schleife 4 ausgeführt. Der Kommando-Knoten, welcher der Schleife 4 untergeordnet ist, setzt den Zelldruck wieder auf den Wert vor der Erhöhung um $\Delta\sigma$ zurück und genau diese Beschreibung wird im letzten Meldungsknoten ausgegeben. Danach gelangt man wieder in das übergeordnete Auswahlménü der Versuchsabschnitte.



Abb. 3.23: Prüfvorschrift B-Test [Wille Geotechnik, adaptiert]

3.7.5 Konsolidation

Als Konsolidation bezeichnet man jenen Vorgang, bei welchem unter gleichbleibender Belastung Porenwasser aus dem Probekörper ausgedrückt wird, was eine Volumenverminderung des Probekörpers zur Folge hat. Diese Volumenverminderung entspricht nur einer Verminderung des Porenraumes, welche durch eine Umordnung der einzelnen Körner zu einer dichteren Lagerung zustande kommt, wobei sich das Volumen der einzelnen Körner nicht verändert. Beim Konsolidationsvorgang erfolgt demnach eine Abnahme des Wassergehaltes sowie des Porenanteils. [4]

Während des Konsolidationsvorganges sind vor Allem die Parameter Zeit, Volumendehnung sowie Vertikalverformung des Probekörpers von Bedeutung.

Die Vertikaldehnung berechnet sich dabei folgendermaßen:

$$\varepsilon_v = \frac{H_i - H}{H_i}$$

H_i ... Anfangshöhe des Probekörpers

H ... Probenhöhe

Die volumetrische Dehnung berechnet sich nach:

$$\varepsilon_{vol} = \frac{V_i - V}{V_i}$$

V_i ... Anfangsvolumen des Probekörpers

V ... Probenvolumen

Die Vertikaldehnung und die volumetrische Dehnung werden während der Konsolidation in einem Diagramm aufgetragen und mitverfolgt. Die Konsolidation kann laut ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] als abgeschlossen angesehen werden, wenn die Volumenänderung der Zellflüssigkeit je Stunde weniger als 0,1% des Probevolumens oder weniger als 0,1 cm³ beträgt.

Der Ablauf der Konsolidation kann anhand der Abb. 3.24 erläutert werden. Betrachtet wird, ähnlich zum Triaxialversuch, eine Bodenschicht mit der Dicke 2H, welche an der Oberseite und der Unterseite drainieren kann. Die Belastung der Bodenschicht erfolgt zum Zeitpunkt t=0 durch

eine unendlich ausgedehnte Flächenlast p_0 . Unmittelbar nachdem die Last aufgebracht wurde, wird die gesamte Auflast vom Porenwasser als Porenwasserüberdruck $u=p_0$ abgetragen. Zu diesem Zeitpunkt erfährt das Korngerüst noch kaum eine Belastung. Wie auf der rechten Seite in Abb. 3.24 dargestellt, wird der Porendruck lediglich an den Rändern, welche an die Drainage grenzen, sofort abgebaut. Die Abbildung zeigt den weiteren Verlauf der Porendruckverhältnisse anhand der Isochronen, wobei erst zum Zeitpunkt $t=\infty$ der Porendruck vollständig abgebaut ist und die gesamte Last vom Korngerüst abgetragen wird. [3]

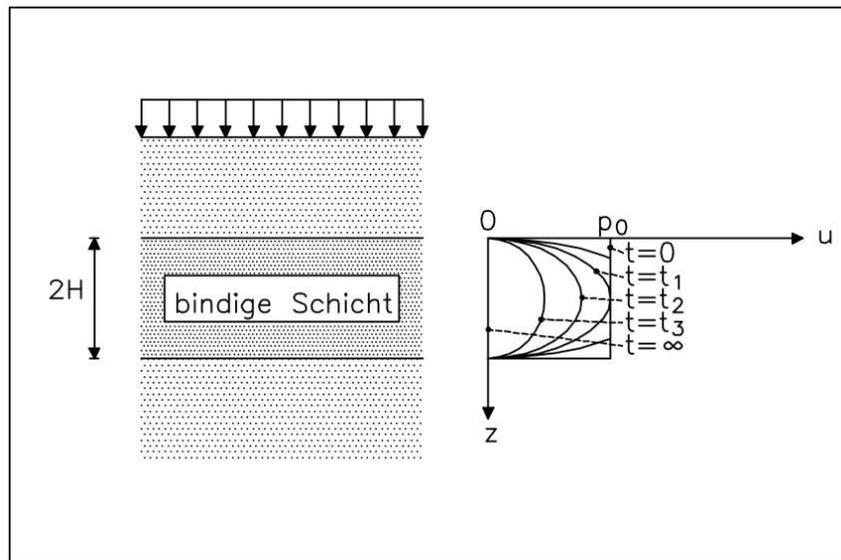


Abb. 3.24: Momentane Verteilungen des Porenwasserüberdrucks (Isochronen) während der Konsolidierung einer bindigen Schicht [3]

Anhand dieser theoretischen Überlegungen wurde von *Terzaghi* eine Differentialgleichung zur Beschreibung des eindimensionalen Konsolidationsvorganges hergeleitet. Unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen kann die Konsolidationszeit durch Lösung der Differentialgleichung für einen bestimmten Konsolidierungsgrad angeschrieben werden: [4]

$$t = T_v \cdot \frac{h^2 \cdot \gamma_w}{k_f \cdot E_s}$$

T_v ... dimensionsloser Zeitfaktor

h ... längster Drainweg

γ_w ... Wichte von Wasser

k_f ... Durchlässigkeitsbeiwert

E_s ... Steifemodul

Zur Ermittlung der maximal zulässigen Abschergeschwindigkeit wird nach Beendigung des Konsolidationsvorganges ein Diagramm erstellt, bei welchem die Vertikalverformung über den Logarithmus der Zeit aufgetragen wird. Um beim Abschervorgang eines konsolidierten drainierten Triaxialversuches sicherzustellen, dass keine nennenswerten Porendrücke entstehen, muss die Abschergeschwindigkeit langsam genug gewählt werden. Um diese Geschwindigkeit zu bestimmen, besagt die ÖNORM EN ISO 17892-9 [1], dass man durch ein Verfahren, welches in der

ÖNORM EN ISO 17892-5 [12] geregelt ist, die Abschergeschwindigkeit ermitteln muss. Bei diesem Verfahren wird der Konsolidationsverlauf des Probekörpers betrachtet, wobei man aus der Zeit-Setzungskurve den Wert t_{50} bzw. t_{100} , der für die Zeit steht bei welcher 50% bzw. 100% der Primärkonsolidation abgeschlossen ist, ermitteln muss. Mittels dieser Werte wird anschließend die maximal zulässige Abschergeschwindigkeit mit folgender Formel berechnet:

$$v_{max} = \frac{H_c \cdot \varepsilon_{vf}}{F \cdot t_{50}} \quad \text{oder} \quad v_{max} = \frac{H_c \cdot \varepsilon_{vf}}{\frac{F}{4} \cdot t_{100}}$$

H_c ... Probekörperhöhe nach Konsolidation

ε_{vf} ... erwartete Vertikaldehnung im Bruchzustand

F ... Faktor zur Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit

t_{50} ... Zeit, die erforderlich ist, um 50% Prozent Primärkonsolidation zu erreichen

t_{100} ... Zeit, die erforderlich ist, um 100% Prozent Primärkonsolidation zu erreichen

Dabei unterscheidet sich der Parameter F je nachdem ob ein drainierter oder ein undrainierter Versuch durchgeführt wird.

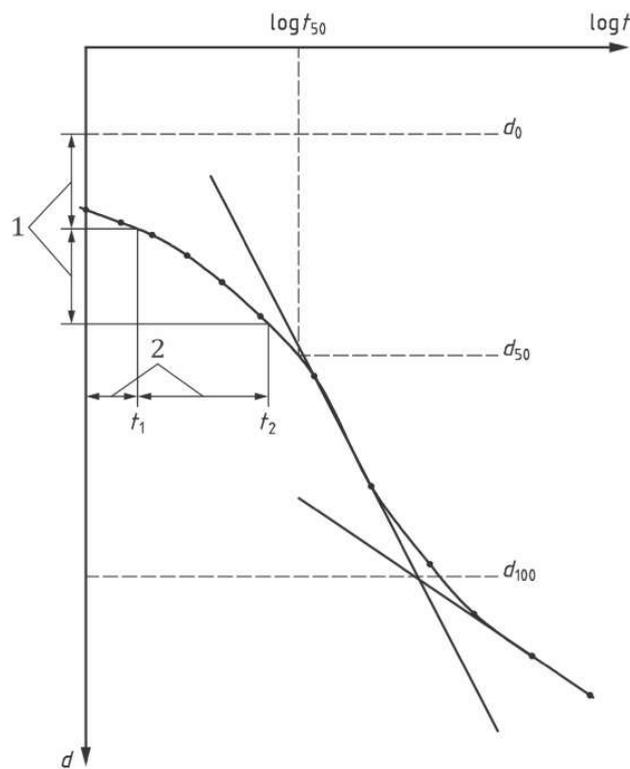


Abb. 3.25: Beispielhafte Konsolidationskurve mit logarithmischer Darstellung der Zeit [12]

In GEOsys ist die Phase der Konsolidation einfach zu erstellen. Wie in Abb. 3.26 dargestellt, beginnt die Phase wieder mit einer Schleife, welche zu laufen beginnt, wenn im übergestellten Menü Konsolidation ausgewählt wird. Als nächstes werden in der Parametermenge die Werte für den Zellendruck und den Porendruck definiert. Dabei entspricht die Differenz von Zellendruck zu Porendruck der effektiven Spannung, mit welcher der Probekörper konsolidiert wird. Diese effektive Spannung entspricht der Seitendruckspannung beim späteren Abschervorgang.

Der untergeordnete Kommando-Knoten gibt die Aufforderung die Drainageventile zu öffnen. Die darunter angeordnete Datentabelle dient der Erstellung eines Textfiles für den Konsolidationsvorgang. Der Datentabelle untergeordnet ist ein Verzweigungsknoten, welcher beendet wird, wenn beide seiner Unterknoten ausgeführt sind. Der erste Unterknoten ist ein Kommando, welches den Zelldruck mit einer definierten Spannungsrate auf den Zielwert einstellt. Gleichzeitig beginnt der Kommando-Knoten, welcher der Schleife untergeordnet ist, den Porendruck auf den definierten Zielwert zu fahren. Die Schleife ist angeordnet, da der Porendruck nicht gesteuert werden kann, wenn die Drainageventile geschlossen bleiben. Dies ist in der Regel nicht der Fall, da die Konsolidation immer drainiert erfolgt.

Der letzte Knoten im Abschnitt der Konsolidation gibt die Meldung aus, dass der Konsolidationsvorgang läuft, bis der „weiter“ Button auf der Meldung geklickt wird. Dies wird laut ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] ausgeführt, wenn die Volumenänderung der Zellflüssigkeit je Stunde weniger als 0,1% des Probevolumens oder weniger als 0,1 cm³ beträgt.

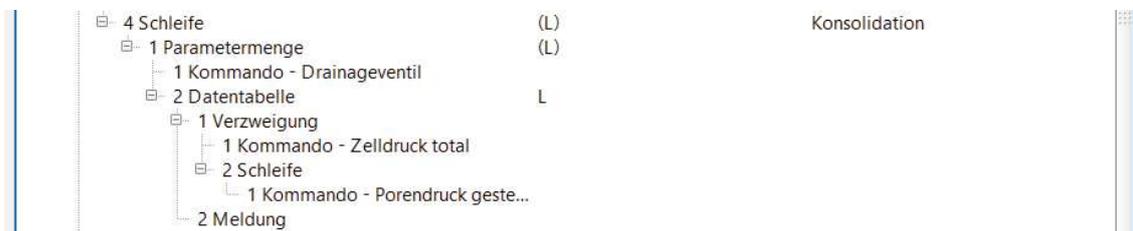


Abb. 3.26: Prüfvorschrift Konsolidation [Wille Geotechnik, adaptiert]

3.7.6 Abscheren

Beim Abscheren wird zwischen drainiertem und undrainiertem Abschervorgang unterschieden. In dieser Arbeit wurden überwiegend drainierte Versuche durchgeführt, weshalb diese nachfolgend erläutert werden.

Bei drainierten Versuchen finden sowohl die Konsolidation als auch das Abscheren bei geöffnetem Porenwasserdrucksystem statt. Das bedeutet, dass sich die Menge des in der Probe enthaltenen Wassers mit dem Volumen ungehindert ändern kann. Damit es zu keinen Porenwasserdrücken kommt und die Änderung der totalen und effektiven Spannungen mit zunehmender Verformung gleich bleibt, muss die Abschergeschwindigkeit entsprechend langsam eingestellt sein [4]. Die Berechnung dieser Abschergeschwindigkeit wurde im Kapitel 3.7.5 erläutert.

Nachdem die Abschergeschwindigkeit definiert wurde, wird der Abschervorgang gestartet. Dabei wird der Probekörper mit dem Druckstempel mit konstanter Geschwindigkeit zusammengedrückt. Mittels der Kraft, die bei diesem Vorgang gemessen wird, kann die aufgebrachte Spannung σ_1 berechnet und mit einer bestimmten Rate aufgezeichnet werden. Das Aufzeichnungsintervall muss dabei klein genug gewählt werden, damit bei der Auswertung der Zeitpunkt des Bruches klar erkennbar ist. Während des Abschervorganges werden unter anderem die Parameter Zeit, Höhenänderung, Volumen des ausgedrückten Wassers, der Zelldruck sowie die Stempelkraft aufgezeichnet. Anhand dieser Parameter errechnet GEOsys laufend die Werte für die Vertikalverformung, die Deviatorspannung sowie die Volumendehnung.

Die Vertikaldehnung während des Abscherens wird berechnet anhand der Formel:

$$\varepsilon_{sv} = \frac{\Delta H - \Delta H_c}{H_i - \Delta H_c}$$

ΔH ... Änderung der Höhe des Probekörpers

ΔH_c ... vertikale Höhenänderung während der Konsolidation

Für die Berechnung der Vertikalspannung und folglich der Deviatorspannung muss aufgrund der Verformung zunächst die korrigierte Querschnittsfläche berechnet werden. Diese wird berechnet anhand der Formel:

$$A_{cor} = \frac{V_i - \Delta V}{H_i - \Delta H}$$

ΔV ... Volumenänderung des Probekörpers

Bei einem undrainierten Versuch bleibt das Probenvolumen während des Abschervorganges konstant ($\Delta V = 0$), sodass sich die obere Gleichung folgendermaßen vereinfacht:

$$A_{cor} = \frac{A_i}{1 - \varepsilon_v}$$

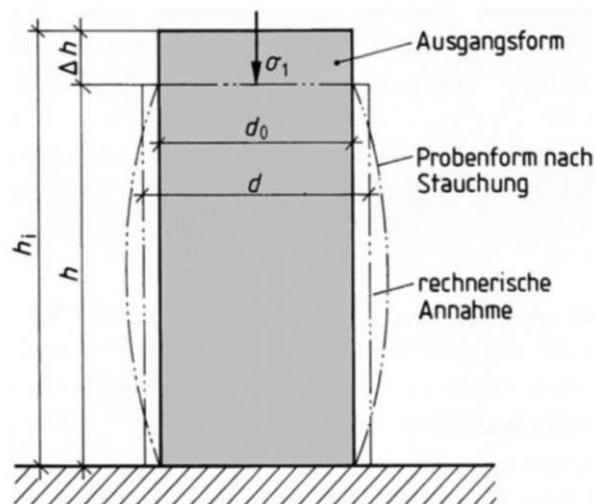


Abb. 3.27: korrigierte Querschnittsfläche [7]

Die totale Vertikalspannung kann anschließend berechnet werden nach:

$$\sigma_1 = \frac{P + \sigma_3 \cdot (A_{cor} - A_p)}{A_{cor}}$$

P ... Vertikalkraft

A_p ... Stempelfläche

Anmerkung: Die in der ÖNORM EN ISO 17892-9 angeführten Korrekturfaktoren für die Eigengewichtskraft, die Gummihülle und das Filterpapier werden hier vernachlässigt.

Die Deviatorspannung errechnet sich nach:

$$\sigma_D = \sigma_1 - \sigma_3$$

Die volumetrische Dehnung während des Abschervens wird berechnet nach:

$$\varepsilon_{svol} = \frac{\Delta V - \Delta V_c}{V_i - \Delta V_c}$$

ΔV_c ... Volumenänderung bis zum Ende der Konsolidation

Diese berechneten Werte werden in einem Diagramm, welches in Abb. 3.28 anhand eines Beispiels dargestellt ist, aufgetragen und während des Versuchs laufend mitverfolgt. Beispielsweise kann somit anhand der Volumendehnungskurve verfolgt werden, ob der Probekörper eine Kontraktion oder Dilatation aufweist.

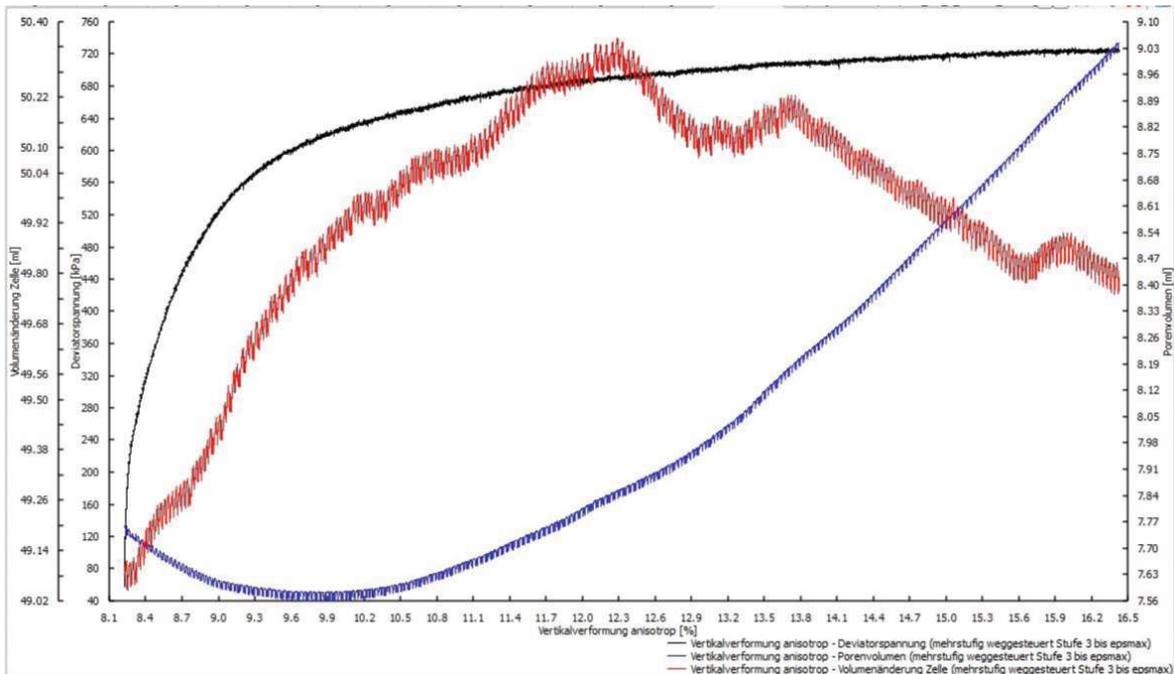


Abb. 3.28: Beispiel eines Diagrammes mit den Messwertverläufen, welches während dem Abscheren von GEOsys erstellt wird

Der Versuch wird laut ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] als beendet angesehen, wenn die Axialdehnung einen Wert von 15% erreicht oder wenn der Wert der Axialdehnung am Höhepunkt der Deviatorspannung um 5% überschritten ist. Weiters darf der Versuch abgebrochen werden, wenn der Wert der Deviatorspannung den Spitzenwert derselben um 20% unterschreitet.

Das Ergebnis eines konsolidierten drainierten Triaxialversuches ist in Abb. 3.29 beispielhaft abgebildet. Die drei *Mohr'schen* Spannungskreise, welche aus drei Versuchen mit verschiedenen Seitendrücken generiert werden, besitzen eine gemeinsame Tangente. Durch das Anlegen dieser Tangente an die *Mohr'schen* Spannungskreise lassen sich direkt die effektiven Scherparameter ermitteln. Dabei wird die Neigung der Tangente als effektiver Reibungswinkel ϕ' und der Schnittpunkt mit der Ordinate als effektive Kohäsion c' angesehen. [4]

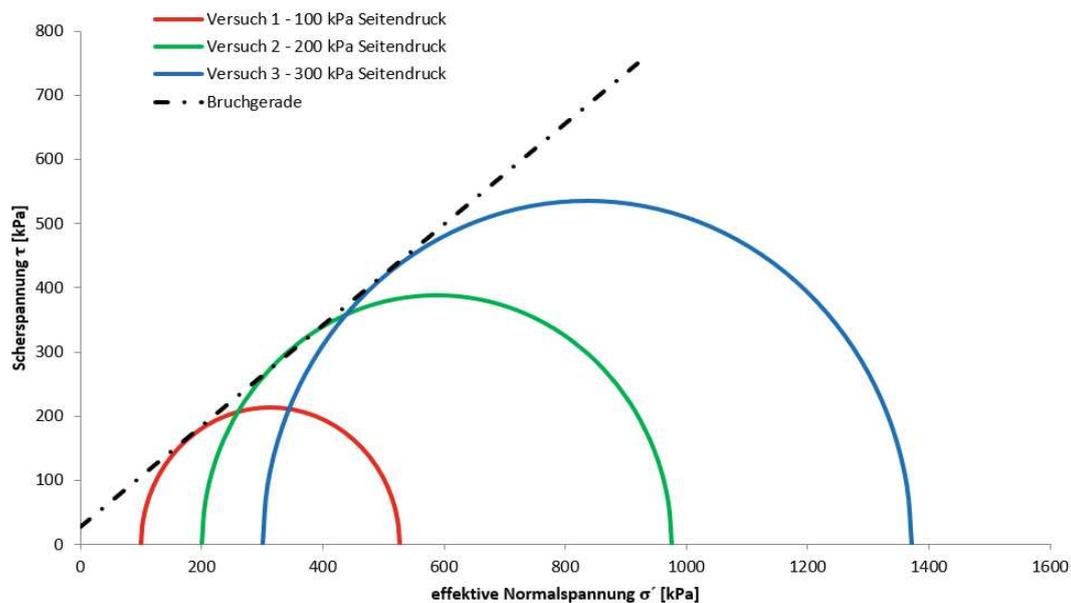


Abb. 3.29: beispielhaftes σ' - τ -Diagramm zur Ermittlung der effektiven Scherparameter bei einem drainierten Triaxialversuch ($\Delta u=0$)

In der Prüfvorschrift wird der Abschervorgang folgendermaßen realisiert:

Wird im übergestellten Menü der Vorgang Abscheren ausgewählt, so wird diese übergestellte Schleife beendet und man springt in den ersten Befehl der Abb. 3.30. Wird dies ausgeführt, so kann nicht mehr zurück zu den Vorgängen der Sättigung und der Konsolidation gesprungen werden.

Aufgrund des übergestellten Sequenz-Knotens werden die drei Kommando-Knoten der Reihe nach ausgeführt. Das erste Kommando setzt den aktuell berechneten Probenquerschnitt als Startwert des Probenquerschnittes für den Abschervorgang. Anhand dieses Startwertes sowie der fortschreitenden Vertikalverformung wird der aktuelle Probenquerschnitt laufend berechnet. Das zweite Kommando setzt die aktuelle Probenhöhe als Startwert der Probenhöhe für den Abschervorgang. Anhand von diesem Startwert und der Veränderung des Vertikalen Weges wird laufend die Vertikalverformung berechnet. Das dritte Kommando setzt wie auch schon in den Initialbedingungen die Deviatorspannung als Startwert auf 10 kPa.

Nachdem diese Kommandos ausgeführt wurden, beginnt die Schleife des Abschervorganges zu laufen. Diese bleibt so lange aktiv, bis in der untergeordneten Parametermenge der Vorgang Entlastung ausgewählt wird. Das Auswahlmenü der Parametermenge, welches ausgeklappt wird, sobald die Schleife aktiviert wird, enthält die Vorgänge konventioneller Triaxialversuch kraftgesteuert, konventioneller Triaxialversuch weggesteuert, mehrstufiger Triaxialversuch weggesteuert und Entlastung. Je nachdem, was ausgewählt wird, gelangt man in die Unterschleifen 2, 3 oder 4.

Wird die Unterschleife 2 aktiviert, wird der konventionelle kraftgesteuerte Triaxialversuch ausgeführt. Dieser wird in dieser Arbeit nicht weiter erläutert, da in der Regel der weggesteuerte Versuch ausgeführt wird.

Unterschleife 3 beginnt zu laufen, wenn der konventionelle weggesteuerte Versuch ausgewählt wird. Der Schleife untergeordnet befindet sich die Parametermenge in welcher die maximale Spannung, die Abschergeschwindigkeit, die maximale Verformung und die Aufzeichnungsrate definiert sind. Dieser untergeordnet ist das Kommando, welches die Aufforderung ausgibt, die Drainageventile zu öffnen. Darunter ist eine Datentabelle angeordnet, welche dem Abschervorgang

ein eigenes Textfile zuweist. Der Datentabelle untergeordnet wird durch das Kommando das eigentliche Abscheren durchgeführt. Dieses Kommando gibt dem Druckstempel die Anweisung mit der definierten Geschwindigkeit bis zur definierten Maximaldehnung zu fahren. Die Meldung wird ausgegeben, wenn die maximale Verformung oder die maximale Spannung erreicht wird. Diese besagt, dass einer der beiden Maximalwerte erreicht wurde und dass durch Klicken von „weiter“ der Abschervorgang abgebrochen wird. Klickt man den „weiter“ Button, gelangt man wieder in das Auswahlmenü und kann durch Auswahl von „Entlastung“ den Versuch abschließen.

Wählt man zu Beginn nicht den konventionellen Versuch, sondern den mehrstufigen Versuch, so gelangt man in die Unterschleife 4, welche im Kapitel 4.6 erläutert wird.

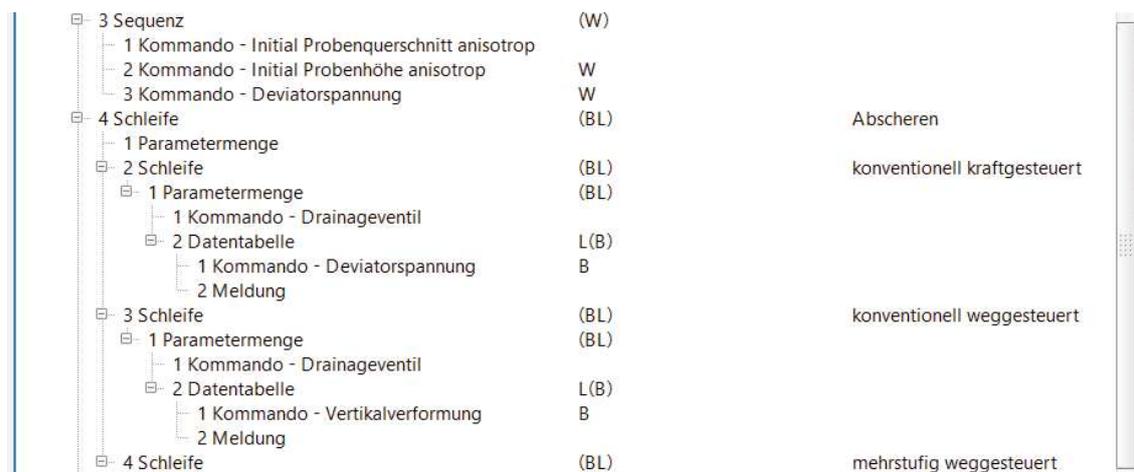


Abb. 3.30: Prüfvorschrift Abschervorgang [*Wille Geotechnik*, adaptiert]

4 Mehrstufiger Triaxialversuch

4.1 Allgemeines

Im Unterschied zum herkömmlichen Triaxialversuch, bei welchem in der Regel drei Prüfkörper gewonnen bzw. hergestellt, eingebaut, gesättigt, konsolidiert, abgeschert und ausgebaut werden müssen, wird beim mehrstufigen Versuch lediglich ein Prüfkörper untersucht. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn nicht genügend Probenmaterial oder genügend Zeit zur Verfügung steht. Um trotzdem genügend Informationen aus dem Versuch zu generieren, damit in weiterer Folge die Scherparameter bestimmt werden können, erfolgt das Konsolidieren und das Abscheren in mehreren Stufen. Wie auch bei den herkömmlichen Versuchen wird der Probekörper eingebaut, gesättigt und mit einem ersten definierten Seitendruck konsolidiert. Bei der Phase des Abscherens gibt es jedoch den Unterschied, dass der Probekörper nicht bis zum vollständigen Versagen abgeschert wird, sondern nur bis zu einem Punkt, an welchem bestimmte Kriterien, welche in Kapitel 4.4 erläutert werden, erfüllt sind.

Nachdem der erste Abschervorgang unterbrochen wurde, wird die Vertikalspannung zurückgefahren, sodass die Deviatorspannung, wie in Abb. 4.1 dargestellt, wieder nahezu null ist. Anschließend wird der Seitendruck auf die nächste Stufe erhöht und die zweite Konsolidationsphase beginnt. Nachdem diese Konsolidation abgeschlossen ist, beginnt die zweite Abscherphase, bei welcher wieder kurz vor dem Versagen abgebrochen wird und anschließend die

Vertikalspannung – und damit die Deviatorspannung – wieder verringert wird. Danach wird der Seitendruck auf die dritte Stufe erhöht und wieder abgewartet, bis die Konsolidation abgeschlossen ist. Der Abschervorgang der dritten Stufe erfolgt schließlich wie beim herkömmlichen Versuch bis zum vollständigen Versagen der Probe. Durch dieses stufenweise Abscheren mit verschiedenen Seitendrücken erhält man schließlich genügend Informationen, um die Scherparameter aus einem einzigen Versuch/Probekörper bestimmen zu können.

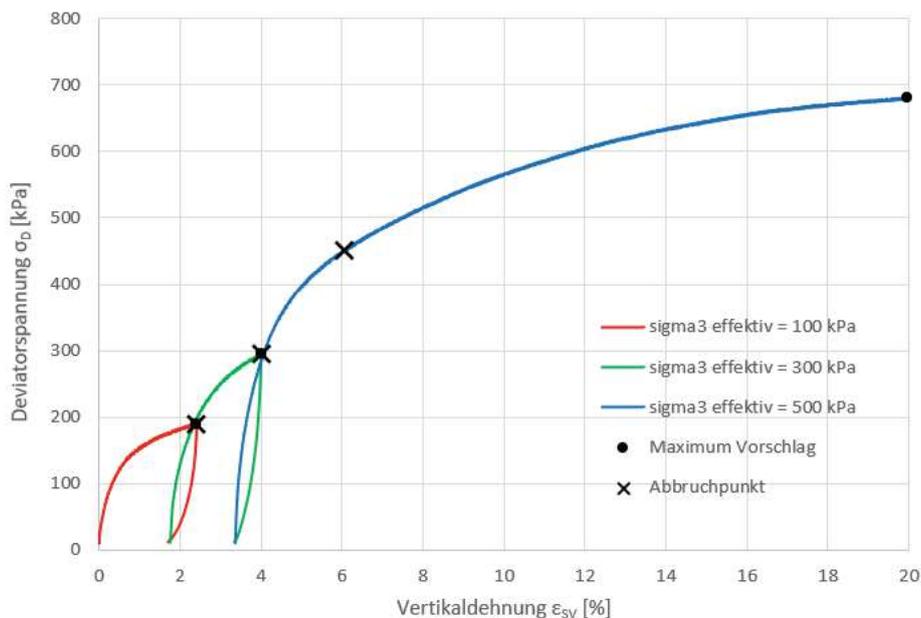


Abb. 4.1: Beispielhafte Spannungs-Dehnungs-Kurve eines mehrstufigen Triaxialversuches

Grundsätzlich muss darauf hingewiesen werden, dass die Entwicklung der mehrstufigen Triaxialversuche und auch die überwiegende Literatur zu diesem Thema aus der Felsmechanik stammt. Es wurden inzwischen jedoch schon einige Arbeiten durchgeführt, in welchen Bodenproben mittels mehrstufigen Triaxialversuchen untersucht wurden. Die grundsätzlichen mechanischen Überlegungen sind identisch.

4.2 Normen und Regelwerke

In Österreich gibt es bisher keine Norm, welche die Durchführung von mehrstufigen Triaxialversuchen regelt. In der ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] gibt es lediglich einen kurzen Verweis, dass Mehrstufenversuche in dem Dokument nicht vollständig behandelt werden. Dies ist im Allgemeinen der einzige Eintrag, welcher in den ÖNORMEN zu mehrstufigen Triaxialversuchen vorhanden ist.

Im Buch *Empfehlungen des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“* [13] gibt es hingegen eine ausformulierte Empfehlung (*DGGT-Empfehlung Nr. 12*), wie mehrstufige Triaxialversuche an Felsproben durchzuführen sind.

Es wird, wie in Kapitel 4.1 bereits ausgeführt, beschrieben, dass durch die stufenweise Belastung aus nur einem Probekörper genügend Informationen gewonnen werden, um die Scherparameter ermitteln zu können.

Die Prüfeinrichtungen sind dabei die gleichen wie sie auch beim herkömmlichen Triaxialversuch zur Anwendung kommen. Besondere Anforderungen bestehen jedoch an das Probematerial. Dieses muss insofern für die Mehrstufentechnik geeignet sein, dass sich ein mögliches Versagen der Probe im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ankündigen muss und nicht ein plötzliches Versagen ohne Erreichen eines Plateaus auftritt. Dies ist anschaulich in Abb. 4.2 dargestellt.

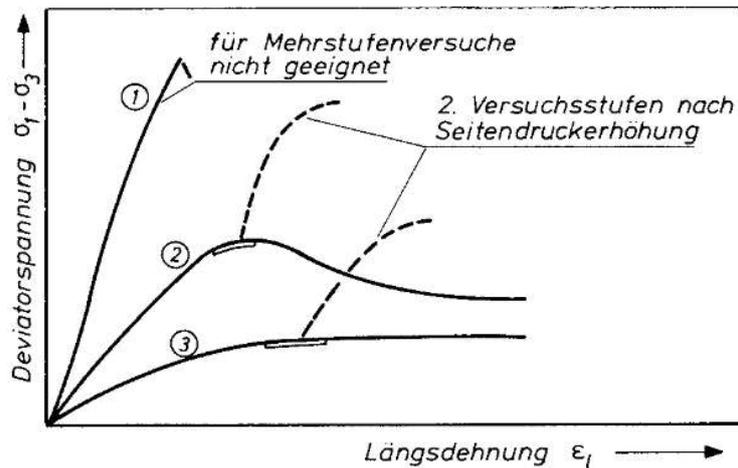


Abb. 4.2: Anforderungen an das Probenmaterial zur Anwendbarkeit der Mehrstufenversuchstechnik. [13]

Eine weitere Herausforderung bei der Durchführung von mehrstufigen Triaxialversuchen ist eine Bedingung zu formulieren, wann der Zeitpunkt erreicht ist, um auf die nächste Seitendruckstufe zu erhöhen. Dabei kann beispielsweise die Unterschreitung eines bestimmten Verformungsmoduls als Kriterium verwendet werden oder man greift auf Daten aus dem einaxialen Druckversuch zurück. Zu diesem Thema gibt es in dieser Empfehlung jedoch keine konkreten Vorgaben.

4.3 Überlegungen zur Versuchsdurchführung

4.3.1 Wissenschaftliche Beiträge zur Versuchsdurchführung

Im Artikel *In-situ-Bestimmung von effektiven Scherparametern in rutschgefährdeten Schichten im Oberen Buntsandstein* [14] wird ein mehrstufiger drainierter konsolidierter Triaxialversuch beschrieben, welcher in Anlehnung an die *DGGT-Empfehlung Nr. 12* durchgeführt wurde.

Es wird beschrieben, dass aufgrund des anstehenden Bodens nicht ausreichend Probekörper für konventionelle Triaxialversuche gewonnen werden konnten. Darum wurde ein mehrstufiger Versuch durchgeführt.

Die Vorgehensweise des mehrstufigen Versuches wird folgendermaßen beschrieben:

Nach dem Einbau und der Sättigung wurde der Probekörper unter der ersten gewählten Zeldruckstufe isotrop konsolidiert. Anschließend wurde der erste Abschervorgang gestartet. Dabei wurde die Axialspannung σ_1 bei konstanter Radialspannung σ_3 gesteigert, bis anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurve erkennbar war, dass die Vorbruchphase beginnt. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Versuch unterbrochen und die Axialspannung σ_1 auf das Ausgangsniveau σ_3 zurückgeführt. Anschließend wurde die Radialspannung auf die zweite gewählte Zeldruckstufe angehoben und der Probekörper wieder isotrop konsolidiert. In weiterer Folge wurde wieder bis zur

Vorbruchphase abgeschert und danach auf der dritten Zelldruckstufe konsolidiert. Beim dritten und letzten Abschervvorgang wurde bis zum vollständigen Versagen belastet. In Abb. 4.3 ist der Probekörper nach dem Versuchsende dargestellt.



Abb. 4.3: Probekörper nach dem mehrstufigen Triaxialversuch [14]

Die untersuchten Zelldruckstufen waren 0,5/1,0/2,0 bar. Die Peakwerte der Deviatorspannung (max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$) betragen jeweils 229/197/382 kN/m². Die erzeugten Spannungspfade sind in Abb. 4.4 dargestellt.

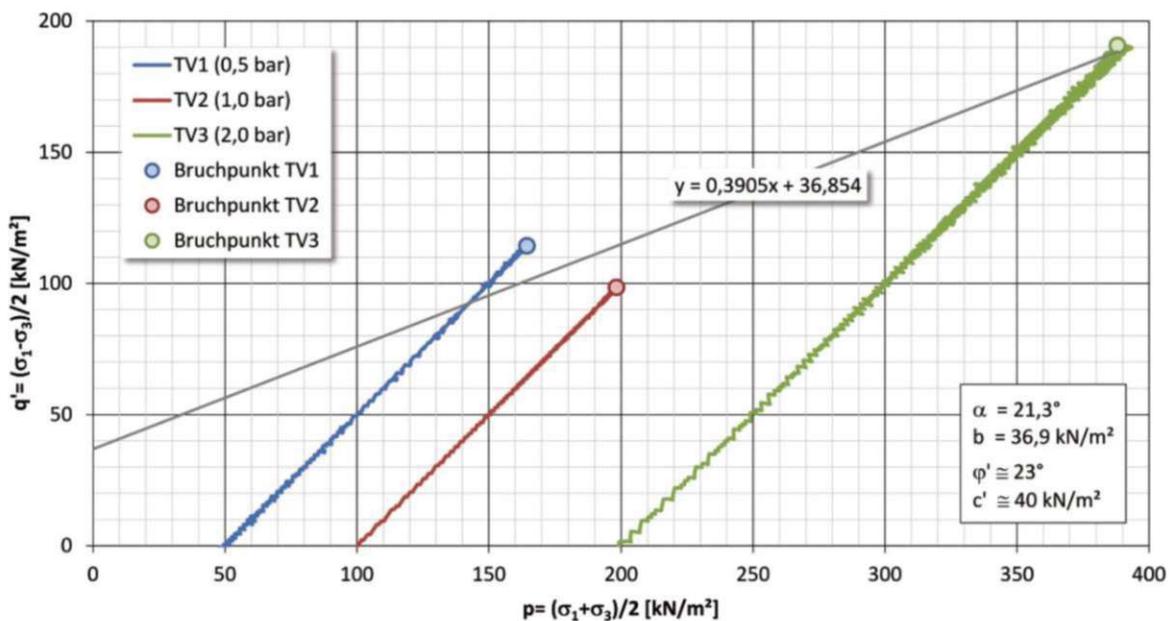


Abb. 4.4: Spannungspfade des mehrstufigen Triaxialversuchs [14]

Gemäß [14] zeigen die Arbeitslinien im Spannung-Dehnungs-Diagramm (in der Literatur leider nicht angegeben) zu Beginn einen steilen linearen Anstieg und im weiteren Verlauf ein starkes Abflachen der Kurve bevor der Bruch eintritt. Laut Abb. 4.2 eignet sich dieser Verlauf der Spannung-Dehnungs-Kurve für die Durchführung von mehrstufigen Triaxialversuchen.

Durch Anpassung einer Ausgleichsgeraden an die einzelnen Bruchpunkte im p' - q -Diagramm, siehe Abb. 4.4, wurde die Scherfestigkeit bestimmt. Die effektiven Scherparameter ergeben sich zu $\varphi' = 23^\circ$ und $c' = 40 \text{ kN/m}^2$.

Die Auswertung der Volumenänderung (in der Literatur leider nicht angegeben) zeigt gemäß [14] am Beginn eine Kontraktanz. Diese nimmt im Verlauf des Abschervorganges ab, wobei sich jedoch keine ausgeprägte Dilatation ausbildet. Die nur in den unteren Druckstufen gemessene relative Volumenzunahme bleibt dabei unter dem Ausgangsniveau.

Der Artikel *Multi-stage triaxial test on brittle rock* [15] befasst sich mit dem Thema von Versagenspunkten bei mehrstufigen Triaxialversuchen.

Zu Beginn wird beschrieben, dass mehrstufige Versuche signifikante Vorteile bringen, wenn die vorhandene Probemenge, die zur Verfügung stehende Zeit oder das Budget für die Laboruntersuchungen limitiert ist. Das Konzept von mehrstufigen Triaxialversuchen wurde Mitte der 1970er Jahre eingeführt. Damals wurden einige Vergleichsversuche mit einstufigen Triaxialversuchen durchgeführt, um die Mehrstufentechnik zu validieren. Man kam zu dem Schluss, dass es für Schiefergesteinsproben gut funktioniert, jedoch für Sandsteinproben nicht.

Neben den Anforderungen an das zu prüfende Material wird in dem Artikel beschrieben, dass die Wahl des „stopping points“, also jenem Punkt, bei welchem auf die nächste Seitendruckstufe erhöht wird, auch vom Urteil des Prüfenieurs abhängt.

Das Konzept von mehrstufigen Triaxialversuchen wird im Artikel mit der Abb. 4.5 und Abb. 4.6 erklärt. Dabei zeigen die beiden Grafiken (a) den Belastungspfad bzw. die Spannungs-Dehnungs-Kurve für einen konventionellen Triaxialversuch. Die Grafiken (b) und (c) zeigen zwei

verschiedene Belastungsmethoden für mehrstufige Triaxialversuche. Bei Methode (b) wird in der ersten Stufe ein Seitendruck σ_3 aufgebracht und anschließend die Axialspannung σ_1 bis zum Erreichen des ersten „stopping point“ gesteigert. Danach wird unter konstanter Axialspannung der Seitendruck auf die nächste Stufe erhöht und die Axialspannung wieder gesteigert etc. Mit dieser Methode bekommt man allerdings nur eine Spannungs-Dehnungs-Kurve, während man bei der Methode (c) drei Spannungs-Dehnungs-Kurven für die unterschiedlichen Seitendruckstufen erhält. Gleich wie zuvor wird bei der Methode (c) in der ersten Stufe ein Seitendruck aufgebracht und anschließend die Axialspannung bis zum ersten „stopping point“ erhöht. Ist dieser erreicht, wird jedoch die Axialspannung bis zu dem Wert von σ_3 abgesenkt und erst danach wird der Seitendruck auf die nächste Stufe erhöht.

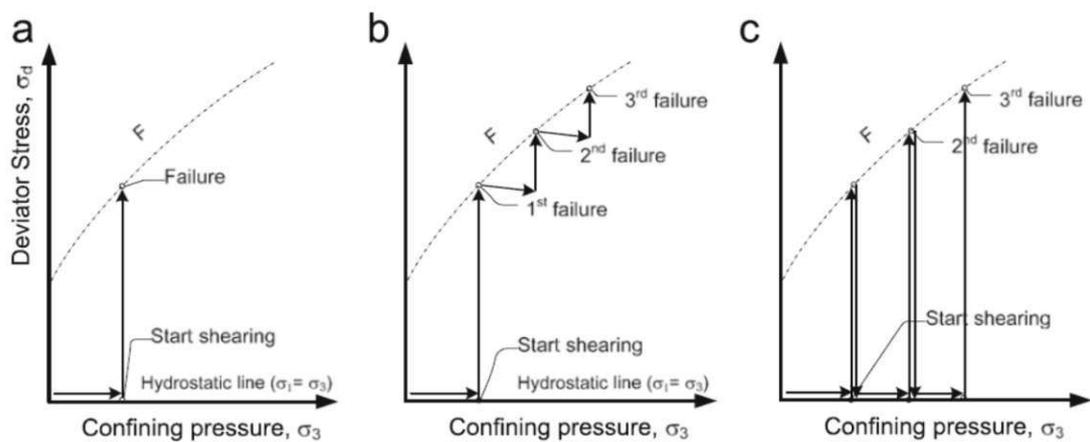


Abb. 4.5: Spannungspfade von: (a) konventionellem Triaxialversuch; (b) mehrstufigem Triaxialversuch (c) modifiziertem mehrstufigen Triaxialversuch [15]

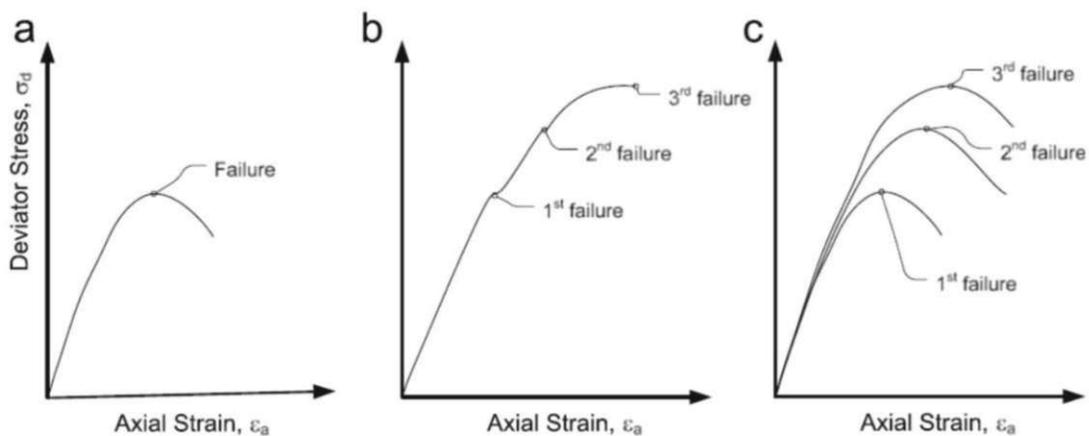


Abb. 4.6: Spannungs-Dehnungs-Kurve von: (a) konventionellem Triaxialversuch; (b) mehrstufigem Triaxialversuch (c) modifiziertem mehrstufigen Triaxialversuch [15]

Der Artikel behandelt weiters ausführlich, wie die Steuerung des Versuches bewerkstelligt werden soll. Bei axialdehnungs-gesteuerten Versuchen kam es bei sprödem Gestein oftmals zum Versagen, bevor man auf die nächste Seitendruckstufe erhöht hatte. Bei solchem Gestein sollten deshalb besser radialdehnungs-gesteuerte Versuche durchgeführt werden.

4.3.2 Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit

Die Versuchsdurchführung, also die stufenweise Be- und Entlastung, wird in dieser Arbeit analog zur Methode (c) von Abb. 4.5 und Abb. 4.6 vom Artikel *Multi-stage triaxial test on brittle rock* [15] durchgeführt.

4.4 Überlegungen zu den Abbruchkriterien

4.4.1 Wissenschaftliche Beiträge zu den Abbruchkriterien

Einer der wichtigsten Punkte, um mehrstufige Triaxialversuche erfolgreich durchführen zu können, ist das Stoppen des Abschervorganges zu einem Zeitpunkt, welcher nah an der Spitzendeviatorspannung liegt, wo jedoch noch keine Zerstörung des Probekörpers passiert ist. Das bedeutet, es müssen Kriterien definiert werden, welche während des Abschervorgangs ständig berechnet und überprüft werden und anhand derer der Abschervorgang bei Erreichen eines Kriteriums abgebrochen wird. Welche Versuchsparameter sich als Abbruchkriterien eignen und wie diese in anderen wissenschaftlichen Arbeiten definiert wurden, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

In der *Empfehlung Nr. 12 des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“* [13] werden die Kriterien zum Abbruch des Abschervorganges bzw. zum Erhöhen auf die nächste Seitendruckstufe folgendermaßen beschrieben:

„Der Seitendruck sollte erhöht werden, unmittelbar bevor der Prüfkörper den Bruchzustand erreicht. Bei Felsarten des Typs 3 (vgl. Abb. 4.2) kann es schwierig sein, den Zeitpunkt zu erkennen, an dem der Deformationswiderstand σ_1 – σ_3 nicht mehr zunimmt. Man sollte dann entweder das Erreichen derjenigen Längsdehnung, bei der Prüfkörper des gleichen Materials im einaxialen Druckversuch in der Regel versagen, als Kriterium für die Erhöhung des Seitendruckes nehmen oder die Unterschreitung eines bestimmten Verformungsmoduls (Tangentenanstiegs). Wenn die Deviatorspannung bei Materialien des Typs 3 keinem konstanten Wert zustrebt, sollte man die Mehrstufenversuchstechnik nicht anwenden.“

In dieser Empfehlung wird beschrieben, dass bei sprödem Fels die Mehrstufenversuchstechnik nicht angewendet werden sollte. Ein derart sprödes Verhalten wie es auch in Abb. 4.2 dargestellt ist, ist bei Böden jedoch nicht zu erwarten.

Grundsätzlich wird in der Empfehlung beschrieben, dass der Seitendruck erhöht werden sollte, kurz bevor der Prüfkörper den Bruchzustand erreicht. Ein Kriterium wie dieser Punkt bestimmt werden könnte, wird mit dem einaxialen Druckversuch beschrieben. Das bedeutet, dass mit dem gleichen Material ein einaxialer Druckversuch durchgeführt werden muss und diejenige Axialdehnung, bei welcher der Probekörper versagt, soll auch als Abbruchdehnung im mehrstufigen Triaxialversuch herangezogen werden. Bei dieser Methode wird jedoch nur ein Wert definiert, bei welchem die erste Stufe des Mehrstufenversuches abgebrochen wird. Es kann demnach nur ein zweistufiger Versuch durchgeführt werden, weshalb diese Methode eher als erster Anhaltspunkt für das Verformungsverhalten eines Materials angesehen werden kann, jedoch für die Definition eines Abbruchkriteriums nicht gut geeignet ist.

Die zweite Methode, die kurz beschrieben wird, ist jene, bei welcher der Verformungsmodul laufend berechnet wird und bei Unterschreitung eines bestimmten Wertes der Abbruch des Abschervorganges durchgeführt wird. In dieser Empfehlung werden keine konkreten Angaben für diese Methode vorgegeben, weshalb die Aussagekraft beschränkt ist. Es ist jedoch eine Methode,

welche auch in anderen wissenschaftlichen Arbeiten beschrieben wird und welche sich für praktisch alle Bodenarten eignet und daher auch in der gegenständlichen Arbeit weiter behandelt wird. Die Umsetzung dieser Methode wird in Kapitel 4.6 beschrieben.

Der Artikel *Multi-stage triaxial test on brittle rock* [15] beschreibt, dass die Identifikation des Abbruchpunktes nur ausreichend genau gelingt, wenn der Triaxialversuch über die Radialdehnung und nicht wie üblich über die Vertikaldehnung gesteuert wird.

Das Versuchssetup, welches für die Durchführung eines radialdehnungsgesteuerten Versuches benötigt wird, ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Radialdehnung des Probekörpers wird dabei durch die laufende Messung der Veränderung des Umfanges berechnet.

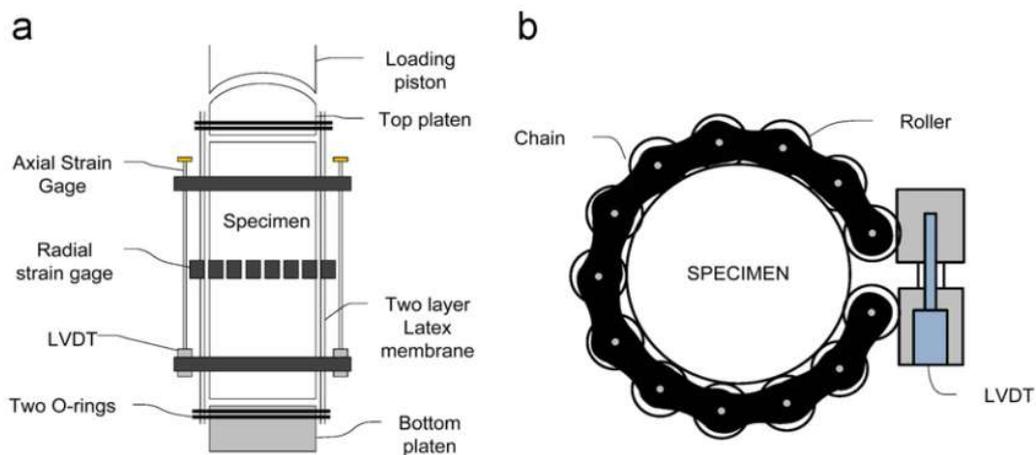


Abb. 4.7: (a) Setup Triaxialversuch; (b) Plandarstellung der Umfangmesskette [15]

Der Grund, warum dieses aufwendigere Versuchssetup gewählt wurde, ist in Abb. 4.8 gut zu erkennen. Laut einer ISRM (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) Norm soll die Abschergeschwindigkeit so langsam eingestellt sein, dass sich der Versagensprozess ankündigt und es dann 5-15 Minuten dauert bis die Probe tatsächlich versagt. Betrachtet man nun Abb. 4.8, so sieht man, dass sich die Radialdehnungskurve langsam einem Plateau annähert, während die Axialdehnungskurve plötzlich abreißt. Mit der Durchführung von einigen Triaxialversuchen wurde durch einen Trial-and-Error Prozess die radiale Abschergeschwindigkeit auf 0,002%/s eingestellt, da der Versagensprozess mit dieser Geschwindigkeit etwa 10 Minuten dauerte.

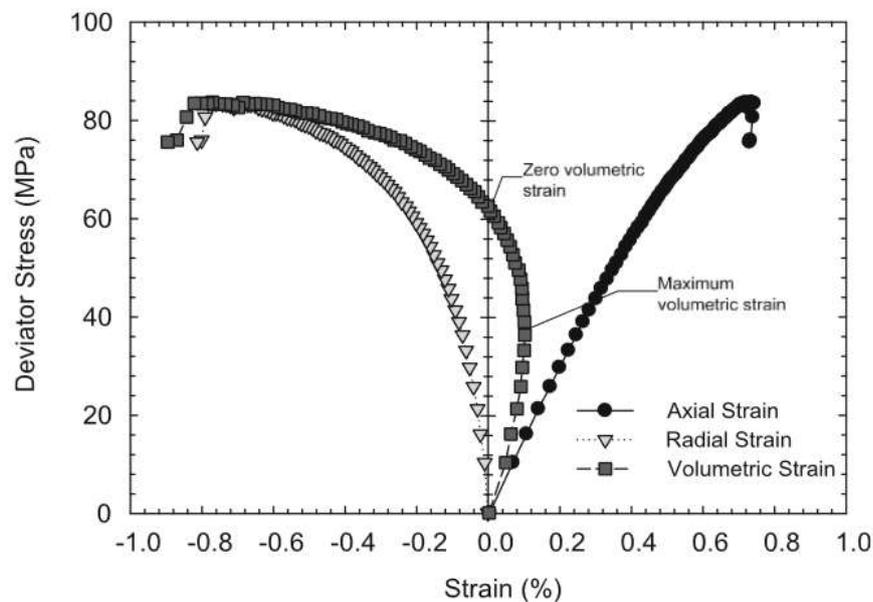


Abb. 4.8: Spannungs-Dehnungs-Kurve eines radialdehnungsgesteuerten Triaxialversuches [15]

Mit diesen Einstellungen und dem in Abb. 4.7 dargestellten Versuchssetup wurden auch mehrstufige Versuche durchgeführt.

Ein Vorteil der radialgesteuerten Versuchsdurchführung ist, dass die Spannungs-Axialdehnungs-Kurve im Bereich der Spitzendeviatorspannung sehr dicht wird (viele Datenpunkte pro Zeiteinheit), woraus man schließen kann, dass der Prüfkörper dem Versagen langsam nahekommt. Demzufolge hat der Bediener des Versuches ausreichend Zeit um das Versagen zu erkennen und den Abschervorgang zu stoppen. Weiters zeigt die Spannungs-Radialdehnungs-Kurve durch das Abflachen auch deutlich das Eintreten der Fließgrenze an, womit man den Versagenspunkt bestimmen kann.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven eines mehrstufigen Versuches, welcher über die Radialdehnung gesteuert wurde, sind in Abb. 4.9 dargestellt. Die Abweichung der ermittelten Scherparameter zwischen dem mehrstufigen Versuch und den ebenfalls durchgeführten konventionellen Triaxialversuchen sind in dieser Arbeit vernachlässigbar klein, weshalb der mehrstufige Versuch für diese Proben eine wirtschaftlichere Alternative zu den konventionellen Versuchen darstellte.

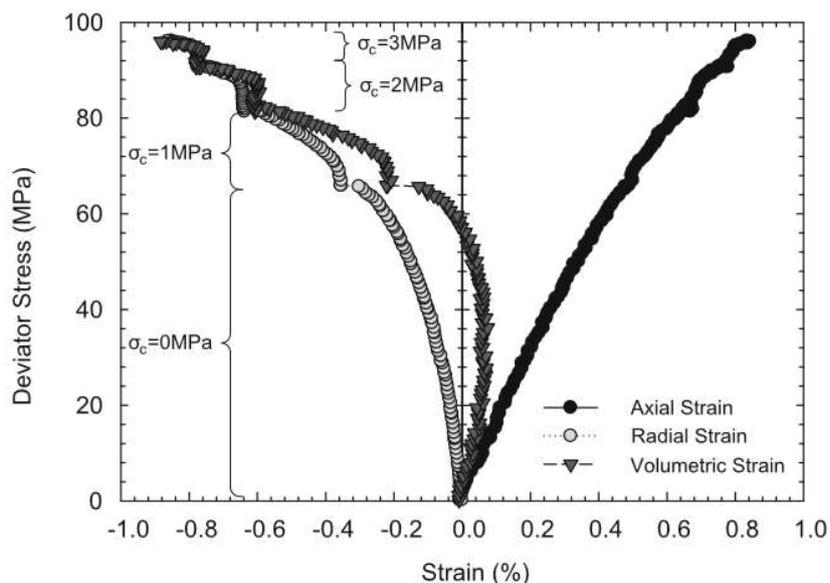


Abb. 4.9: Spannungs-Dehnungs-Kurven eines mehrstufigen Triaxialversuches [15]

Die Abbruchbedingung, welche in dem Artikel [15] angewendet wurde, eignet sich vor Allem für Fels bzw. für spröden Fels, da bei diesem das Versagen plötzlich eintritt. Weiters wird in dem Artikel nicht beschrieben, ob dieses Verfahren automatisiert werden kann. Es wird lediglich beschrieben, dass der Anwender im Labor den Abschervorgang zum Zeitpunkt des Versagens abbrechen soll. In der gegenständlichen Arbeit soll allerdings eine Prüfvorschrift ausgearbeitet werden, mit welcher ein automatisierter mehrstufiger Triaxialversuch an einer Bodenprobe durchgeführt werden kann.

Die Arbeit *Evaluating Volumetric Strain as a Predictor of Yield and Peak Strength for the Multistage Triaxial Test: A Case Study with Utah Coal Specimens* [16] beschreibt, wie der Abbruchpunkt mittels Betrachtung der Spannungs-Volumendehnungs-Kurve definiert werden kann.

In der Abb. 4.10 werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Volumendehnung, die Radialdehnung und die Axialdehnung dargestellt und es sind charakteristische Punkte markiert. Die Punkte auf der blauen Spannungs-Dehnungs-Kurve sind der „Yield Point“ und der „Peak Strength“-Punkt. Der „Yield Point“, welcher als Beginn des Fließens übersetzt werden kann, ist bei der Untersuchung von Bodenproben in dieser Form nicht vorzufinden, da der linear elastische Bereich bei Bodenproben wesentlich geringer ausgebildet ist. Der „Peak Strength“-Punkt ist jener Punkt, bei welchem die maximale Spannung auftritt. Dieser ist bei Bodenproben auch anzutreffen, jedoch ist es dort weniger ein klar definierter Punkt, sondern meist ein kleines Maximalspannungsplateau, welches nicht sofort drastisch abfällt wie jenes in der Arbeitslinie der Abb. 4.10.

Auf der Spannungs-Volumendehnungs-Kurve sind die Punkte des „Inflection Points“ und des „Volumetric Dilation“ Punktes dargestellt. Der „Inflection Point“ ist jener Punkt bis zu dem der Probekörper eine Kontraktion, also eine Volumenverkleinerung erfährt. Nachdem der „Inflection Point“ erreicht ist, vergrößert sich das Volumen wieder und erreicht nach weiterem Abschervorgang den „Volumetric Dilation“ Punkt. Dies ist jener Punkt, bei welchem das Volumen wieder seinen Startwert erreicht. Vergrößert sich das Volumen weiter, spricht man von Dilatation, was aufgrund

von Gefügauflockerungen und der Vergrößerung von Rissen eintritt. Dieses Verhalten ist sowohl bei gewissen Gesteinsproben als auch bei bestimmten Bodenproben anzutreffen.

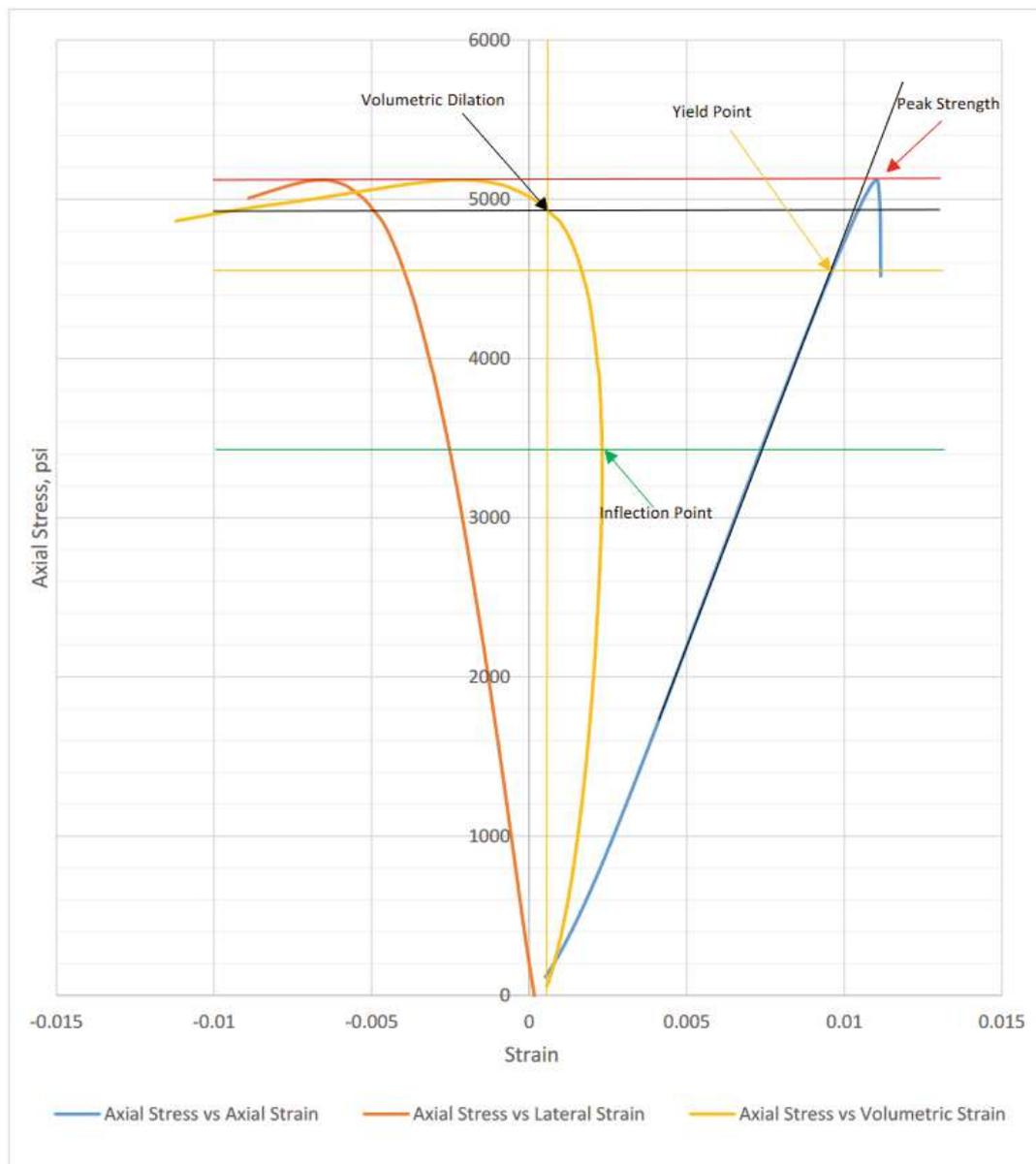


Abb. 4.10: Spannungs-, Volumen-, Axial-, Radial-Dehnungs-Kurven eines konsolidierten drainierten Triaxialversuches [16]

Die „Inflection Points“ und „Dilation Points“ können als Kriterien für den Abbruchpunkt definiert werden.

Beispielsweise wendete *Pagoulatos* [17] das Kriterium des „Inflection Points“ bei der Durchführung von mehrstufigen Triaxialversuchen an Sandsteinproben an und erreichte mit diesen Versuchen gute Übereinstimmung mit den konventionellen Triaxialversuchen. Wie auch in Abb. 4.10 zu sehen, erreicht man mit dem Abbruch bei dem „Inflection Point“ in der Regel Spannungen, welche unter dem Maximalspannungswert liegen. Diese Methode liegt demnach auf der sicheren Seite in Bezug darauf, dass der Abbruchpunkt gewählt wird, bevor eine Schädigung des

Probekörpers eintritt. Aus diesem Grund bedarf es bei dieser Methode oftmals einer Anpassung bei der Auswertung der Schergeraden. Näheres dazu ist in Kapitel 4.5 erläutert.

Die Anwendung des „Dilation Points“ als Abbruchkriterium findet man beispielsweise in dem Artikel von *Crawford und Wylie* [18]. Dabei wurden Sandsteinproben und Granitproben untersucht. Bei den Sandsteinproben erzielte man gute Übereinstimmung der mehrstufigen Triaxialversuche mit den konventionellen Triaxialversuchen. Bei den Versuchen mit Granit konnte der Punkt der Volumen-Dilatation jedoch erst erreicht werden, nachdem die Proben versagt haben. Für dieses Material war das Kriterium der Dilatation demnach nicht erfolgreich anwendbar.

Im Artikel *Experimental investigation on strength and failure behavior of carbonate rocks under multistage triaxial compression* von *Orilogi* [19] wird beschrieben, dass der Belastungspfad sowie ein adäquates Kriterium für den „imminent failure point“ ausschlaggebend für die Durchführung eines erfolgreichen mehrstufigen Triaxialversuches sind.

Es wird beschrieben, dass die Definition der Kriterien basierend auf den Änderungen der Axial-, Lateral- oder Volumendehnung sind. Die Kriterien sind in Abb. 4.11 dargestellt. Die Grafik (a) zeigt das in der Literatur am häufigsten vorkommende Kriterium, bei welchem man die Deviatorspannungs-Axialdehnungs-Kurve verfolgt und den Versuch abbricht, wenn sich die Deviatorspannung nicht mehr ändert, obwohl die Axialdehnung weiter zunimmt. Die Grafik (b) zeigt die Deviatorspannungs-Volumendehnungs-Kurve. Dabei wird der Abbruchpunkt an jenem Umkehrpunkt definiert, bis zu welchem eine Volumenkontraktion stattfindet. Nach Überschreitung von diesem Punkt würde sich der Probekörper wieder auflockern. Die Grafik (c) zeigt die *Young's* Modul-Axialdehnungs-Kurve. Diese verläuft im Prinzip ident mit der Deviatorspannungs-Axialdehnungs-Kurve und wird ebenfalls an dem Punkt abgebrochen, an welchem die Steigung zu null wird. Zuletzt wird in Grafik (d) die Deviatorspannungs-Radialdehnungs-Kurve betrachtet. Die Vorteile dieser Methode wurden bereits im Artikel *Multi-stage triaxial test on brittle rock* [15] erläutert.

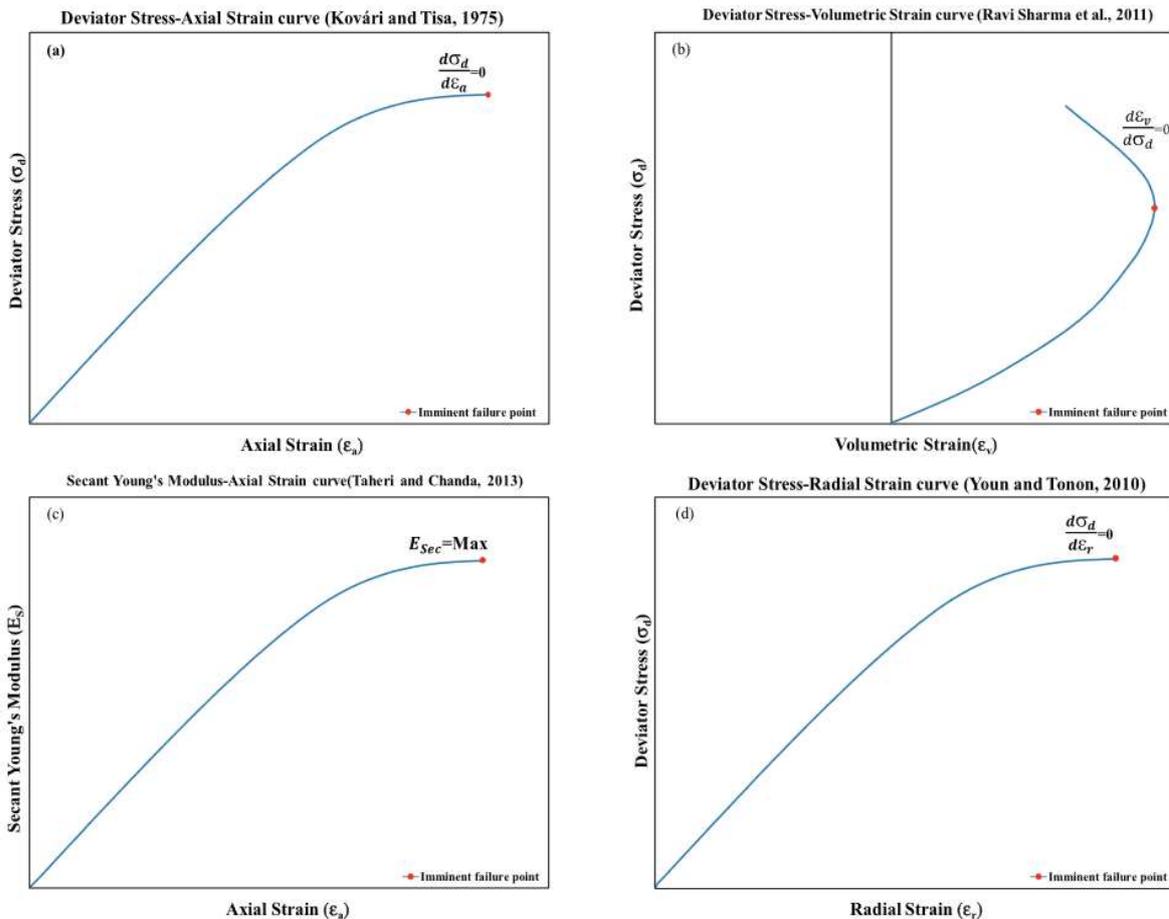


Abb. 4.11: Kriterien zur Definition des Abbruchpunktes [19]

Welche Methode die Autoren des Artikels für deren Versuche gewählt haben, wurde nicht erwähnt. Es wird jedoch im Kapitel der Diskussion noch ein weiterer spezieller Aspekt von mehrstufigen Triaxialversuchen behandelt, welcher die Auswertung betrifft. Dieses Thema wird in Kapitel 4.5 behandelt.

Der Titel des letzten Artikels welcher in diesem Kapitel näher betrachtet wird lautet *Suction-controlled multistage triaxial testing on clayey silty soil* von Banerjee, Puppala and Hoyos [20]. In diesem Artikel werden mehrstufige Triaxialversuche an feinkörnigen Bodenproben durchgeführt und es wird beschrieben, mit welchen Kriterien der Abbruchpunkt definiert wurde. Das im Artikel beschriebene Material ist ähnlich zu jenem, mit welchem die ersten Triaxialversuche in der gegenständlichen Arbeit durchgeführt wurden. Aus diesem Grund dienen die Abbruchkriterien, welche in der Arbeit [20] definiert wurden, als gute Anhaltspunkte für die Erarbeitung der mehrstufigen Prüfvorschrift in der gegenständlichen Arbeit.

In Abb. 4.12 sind die beiden Kriterien dargestellt, anhand welcher in der Arbeit [20] der Abschervorgang gestoppt wurde:

- Die Grafik (a) zeigt ein Verfahren, bei welchem man den aktuellen Tangentenmodul mit dem Initialmodul vergleicht. Der Initialmodul ist dabei ein Sekantenmodul, welcher bei einer Axialdehnung von 0,25% berechnet wird. Der Tangentenmodul wurde

angenähert berechnet, indem 20 Spannungswerte über eine Dehnung von 0,05% gemittelt wurden und anschließend die Steigung über diesen Bereich berechnet wurde. Als Abbruchkriterium wurde ein Verhältnis von Initialmodul zu Tangentenmodul von 25 definiert. Das bedeutet, wenn der aktuelle Tangentenmodul geringer als der Initialmodul geteilt durch 25 ist, wird der Versuch abgebrochen. Bei der zweiten Stufe wurde $E_i / E_r = 15$ definiert. E_i steht dabei für den Initialmodul und E_r für den Tangentenmodul. Die Werte 25 und 15 sind Erfahrungswerte der Autoren. Diese sind demnach nicht allgemeingültig. Die Autoren beschreiben, dass aus ihrer Sicht durch eine Anpassung der Werte in weiteren Studien die Endergebnisse jedoch nicht maßgeblich beeinflusst werden würden.

- Die Grafik (b) zeigt das zweite Kriterium, welches im Artikel zuvor schon beschrieben wurde. Es besagt, dass der Abbruch am Maximum der Volumenkontraktion erfolgt.

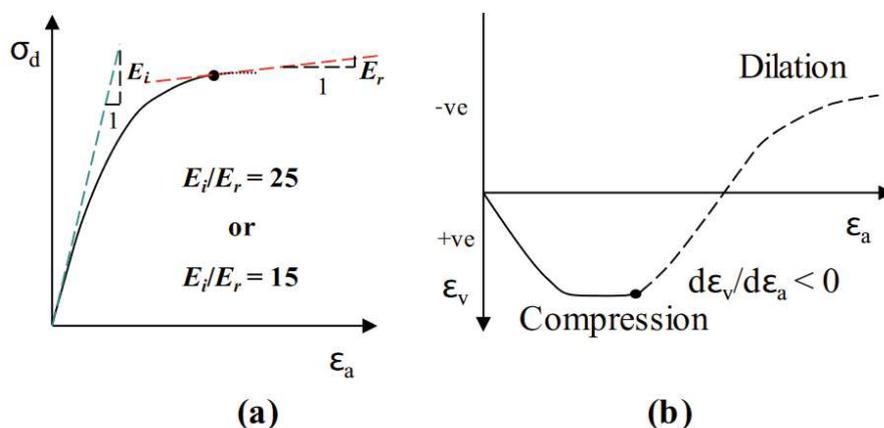


Abb. 4.12: Definition der beiden Abbruchkriterien [20]

Während des Abscherens wurden beide Kriterien laufend berechnet. Der Versuch wurde gestoppt, sobald eines der beiden Kriterien erfüllt wurde. Diese Methode ermöglicht es, verschiedene Bodenarten automatisiert prüfen zu können, ohne Gefahr zu laufen, dass die Probe versagt, bevor ein Kriterium erfüllt ist. Beispielsweise weist nicht jeder Boden dilatantes Verhalten auf, weshalb das Kriterium der Dilatation niemals erfüllt werden könnte. Trotzdem würde der Versuch abgebrochen werden, da das Kriterium der Modulverhältnisse schlagend werden würde. Mit dieser Methode könnten demnach mit sämtlichen Bodenarten mehrstufige Triaxialversuche durchgeführt werden. Um diese Aussage zu untermauern, müssten jedoch noch wesentlich mehr Versuche durchgeführt werden. [20]

4.4.2 Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit

Wie im vorherigen Absatz beschrieben, dienen die Abbruchkriterien, welche in dem Artikel *Suction-controlled multistage triaxial testing on clayey silty soil* von Banerjee, Puppala and Hoyos [20] beschrieben sind, als Anhaltspunkt für diese Arbeit. Die gewählten Kriterien und ihre Eigenschaften werden demnach für diese Arbeit folgendermaßen definiert:

- Modulkriterium:
 - Initialmodul bei 0,25%
 - $E_i / E_r = 25$ bei Stufe 1

- $E_i / E_r = 15$ bei Stufe 2
- **Volumenkriterium:**
 - $d\varepsilon_v / d\varepsilon_a < 0$
 - Anmerkung: Bei einem undrainierten Versuch ist das Probekörpervolumen beim Abschervorgang konstant. Aus diesem Grund kann bei einem undrainierten Versuch das Volumenkriterium nicht angewendet werden.

4.5 Überlegungen zur Konstruktion der Bruchgeraden

4.5.1 Wissenschaftliche Beiträge zur Konstruktion der Bruchgeraden

Da der Abbruch der einzelnen Stufen erfolgen sollte, bevor ein Versagen des Probekörpers eintritt, wird die tatsächliche Bruchspannung nicht erreicht. Um die Bruchgerade dennoch bestimmen zu können, gibt es in der Literatur Ansätze wie diese konstruiert werden kann.

In der Publikation *Evaluation of multistage triaxial testing on Berea sandstones* von Pagoulatos [17] schlägt der Autor vor, dass bei mehrstufigen Triaxialversuchen als Abbruchbedingung der „deflection point“, also jener Punkt der maximalen Volumenkontraktion, am geeignetsten ist. Versuche, welche in der Arbeit [17] durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass der „deflection point“ bei einem Spannungswert erreicht wird, welcher einen konstanten Abstand zum maximalen Spannungswert beim Versagen aufweist. In Abb. 4.13 sind die Ergebnisse von sieben Triaxialversuchen dargestellt. Der Seitendruck ist mit σ_c bezeichnet, die Deviatorspannung bei Erreichen des „deflection points“ ist mit σ_{defl} bezeichnet und die Versagensspannung ist mit σ_f bezeichnet. Der Differenzwert $\sigma_f - \sigma_{\text{defl}}$ ist immer nahezu gleich groß.

Sample	σ_c MPa	σ_{defl} MPa	σ_f MPa	$\sigma_f - \sigma_{\text{defl}}$ MPa
H3	3.4	60.7	92.4	31.7
H6	3.4	55.1	88.3	33.1
H14	6.9	65.9	99	33.1
H5	17.2	121.7	152.4	30.7
H12	17.2	116.9	151.7	34.8
H9	24.1	137.2	169.3	32.1
H10	34.5	156.2	189.7	33.5
H13	34.5	161	190	29
Average				32.2
Standard Deviation				1.8
Error				5.6%

Abb. 4.13: Vergleich der Deviatorspannungen beim „deflection point“ und beim Versagen/Bruch [17]

Die Versuche zeigen somit, dass die theoretische Bruchgerade beim „deflection point“ parallel zu jener beim tatsächlichen Bruch ist. Bei einem mehrstufigen Triaxialversuch werden die einzelnen Stufen demnach beim jeweiligen „deflection point“ abgebrochen. Die letzte Stufe wird jedoch bis zum Versagen/Bruch durchgeführt. Die Ergebnisse werden als *Mohr'sche* Kreise aufgetragen und anschließend wird eine theoretische Bruchgerade (Einhüllende) an die *Mohr'schen* Kreise angelegt. Die letzte Stufe hat einen *Mohr'schen* Kreis mit der Deviatorspannung des

Versagens/Bruches. Wie in Abb. 4.14 dargestellt, wird die theoretische Bruchgerade parallel verschoben, sodass diese an den größten *Mohr'schen* Kreis beim ermittelten Versagen/Bruch anliegend ist.

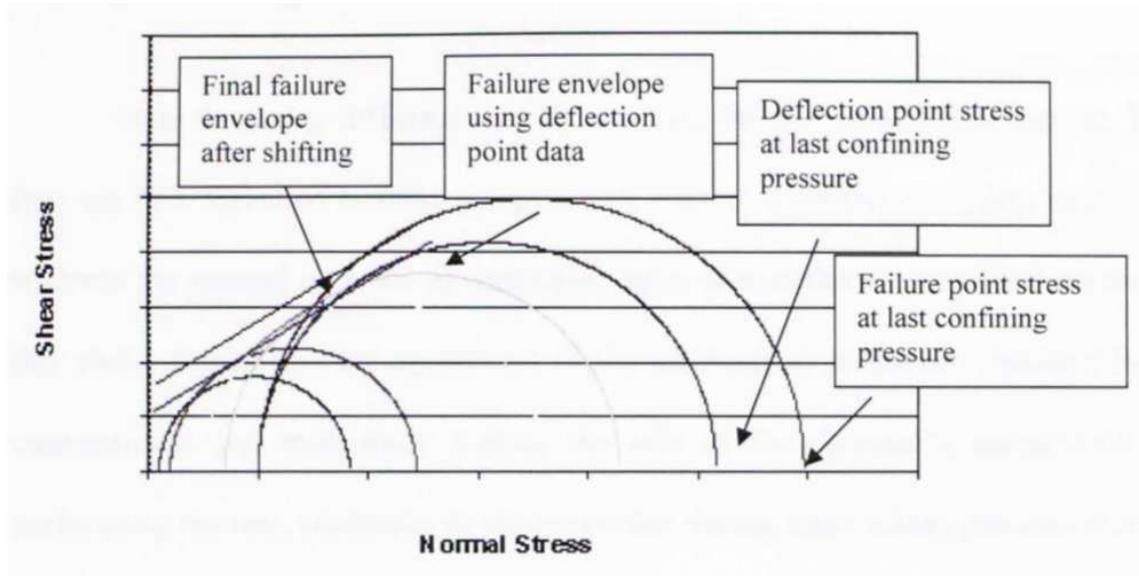


Abb. 4.14: Konstruktion der Bruchgeraden [17]

Die beschriebene Methode wird auch in der Arbeit *Experimental investigation on strength and failure behavior of carbonate rocks under multistage triaxial compression* von Aghababaei, Behnia, and Moradian [19] angewendet, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.

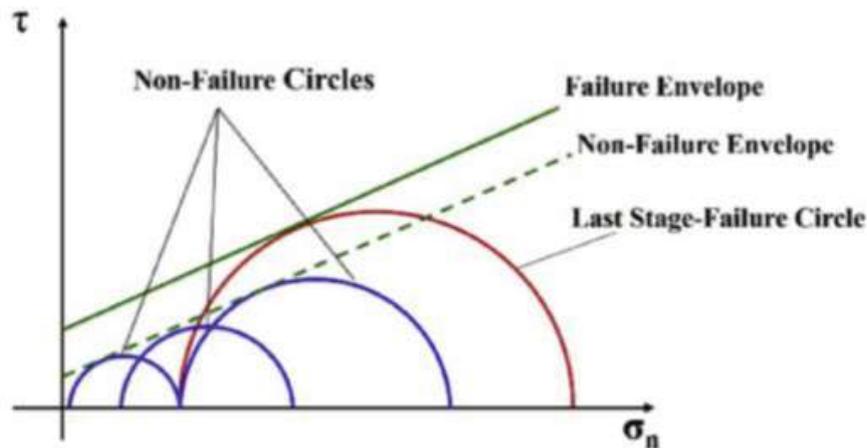


Abb. 4.15: Konstruktion der Bruchgeraden [19]

Weiters wird diese Methode ebenfalls in der Arbeit *Mechanical properties of intact rock an fractures in welded tuff from Newberry Volcano* von Li et al. [21] angewendet, wie nachfolgende Abbildung zeigt.

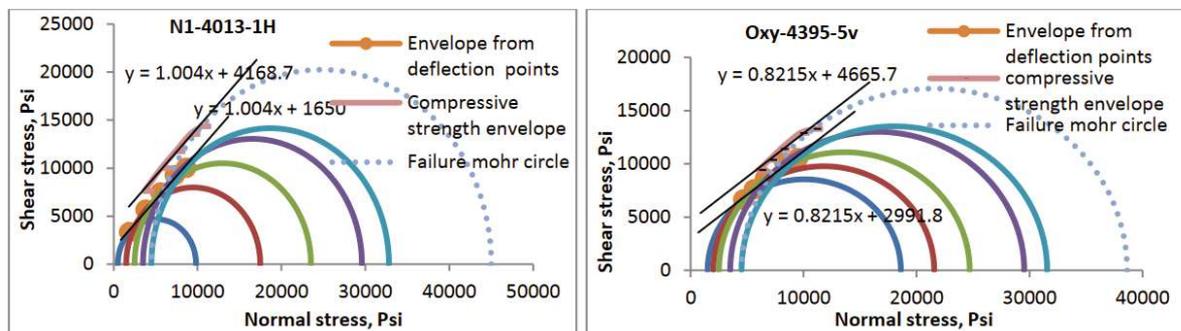


Abb. 4.16: Konstruktion der Bruchgeraden [21]

Die beschriebene Literatur bezieht sich auf das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion. Für das Modulkriterium konnte in Bezug auf die Konstruktion der Bruchgeraden keine Literatur gefunden werden.

4.5.2 Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit

Wenn das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion schlagend wird, dann wird so vorgegangen, wie in der zuvor beschriebenen Literatur [17] [19] [21].

Wenn das Modulkriterium zur Anwendung kommt, dann wird davon ausgegangen, dass zu diesem Zeitpunkt ebenfalls ein Vorbruch in dem Probekörper auftritt. Aus diesem Grund wird die gleiche Auswerterroutine wie beim Kriterium der maximalen Volumenkontraktion angewendet. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass diese Auswertemethodik nicht auf der vorhandenen Literatur basiert und somit im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten zu bestätigen wäre.

Dass bei einem Probekörper bei einer Stufe das eine Kriterium und bei einer anderen Stufe das andere Kriterium greift, davon ist nicht auszugehen, da das Materialverhalten entweder eher spröde oder eher plastisch ist.

4.6 Erläuterung des mehrstufigen Prüfablaufes anhand der entwickelten mehrstufigen Prüfvorschrift

4.6.1 Allgemeines zur mehrstufigen Prüfvorschrift

Nachdem die Funktionsweise und der Ablauf eines mehrstufigen Triaxialversuches erarbeitet und festgelegt wurden, musste dieser Vorgang in eine Prüfvorschrift implementiert werden. Ziel war es, dass mittels der neu erarbeiteten Prüfvorschrift ein mehrstufiger konsolidierter drainierter Triaxialversuch automatisiert durchgeführt werden kann. Die mehrstufige Prüfvorschrift baut auf der Prüfvorschrift des herkömmlichen Versuches auf. Die in Kapitel 3.7 beschriebenen Vorgänge Initialbedingungen, Sättigung, B-Test und Konsolidation der ersten Stufe sind ident und werden somit übernommen. Aufgabe war es demnach, die stufenartige Belastung und Entlastung, sowie die gewählten Abbruchbedingungen in der Prüfvorschrift zu programmieren.

Der Ablauf des mehrstufigen Versuches kann anhand der Abb. 4.17 erklärt werden. Nachdem die erste Konsolidationsphase abgeschlossen ist, wird der mehrstufige Abschervorgang eingeleitet. Die Axialverformung nimmt wie beim herkömmlichen Versuch durch den Vorschub des Druckstempels mit konstanter Geschwindigkeit zu. Dadurch steigt die Deviatorspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$) mit zunehmender Axialstauchung an, bis eines der Abbruchkriterien erfüllt ist.

Wie im letzten Absatz von Kapitel 4.4 beschrieben, wurde das Kriterium „Verhältnis Tangentenmodul zu Initialmodul“ ($E_i/E_r=25/15$) sowie das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion ($d\varepsilon_v/d\varepsilon_a < 0$) zur Definition des Abbruchpunktes verwendet. Wird nun eines dieser Kriterien erfüllt, so wird der Vorschub des Druckstempels gestoppt und anschließend wird dieser wieder zurückgefahren, bis die Ausgangsdeviatorspannung (meist 10 kPa) erreicht ist.

Anschließend wird die zweite Seitendruckstufe aufgebracht und die zweite Konsolidationsphase beginnt. Die zweite Konsolidationsphase läuft gleich wie auch jene vor der ersten Stufe bis die Volumenänderung $< 0,1 \text{ cm}^3/\text{h}$ bzw. $< 0,1\%/h$ des Probevolumens erreicht hat, wobei dies meist schneller erreicht ist, als beim ersten Konsolidationsvorgang. Danach wird der zweite Abschervorgang gestartet, welcher so lange läuft, bis wiederum eines der beiden Abbruchkriterien erreicht ist. Nachdem der zweite Abbruchpunkt erreicht wurde, wird der Druckstempel wieder zurückgefahren, bis wieder die Ausgangsdeviatorspannung erreicht ist.

Anschließend wird die dritte Seitendruckstufe aufgebracht und die Konsolidationsphase wird abgewartet. Nach Abschluss der dritten Konsolidation wird der dritte Abschervorgang eingeleitet, wobei dieser nicht abgebrochen wird, sondern im Normalfall bis zur Maximaldehnung (ca. 15%) bzw. bis zum vollständigen Bruch ausgeführt wird.

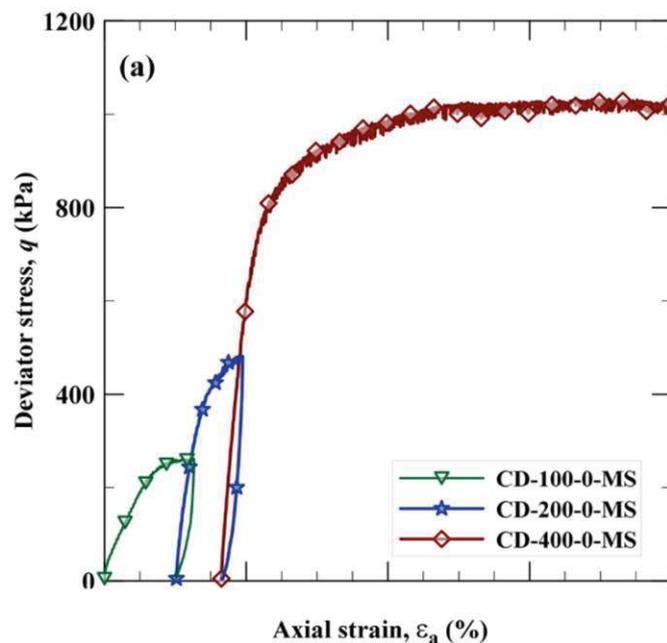


Abb. 4.17: mehrstufiger Triaxialversuch [20]

Ziel war es demnach, den mehrstufigen Versuchsvorgang, welcher anhand von Abb. 4.17 beschrieben wurde, in der Prüfvorschrift im Programm GEOsys zu programmieren. Der Sättigungsdruck und die Seitendruckstufen sollen, wie auch beim herkömmlichen Versuch, zu Beginn des Versuches eingestellt werden. Nachdem diese Parameter eingestellt wurden, soll der Versuch

selbstständig laufen. Lediglich der Sättigungsvorgang und die Konsolidationsvorgänge sollen manuell abgebrochen werden.

4.6.2 Mehrstufige Prüfvorschrift – Stufe 1

In diesem Kapitel wird der Ablauf der ersten Stufe der mehrstufigen Prüfvorschrift in mehrere Abschnitte gegliedert und erläutert. Ein Gesamtbild der Prüfvorschrift der ersten Stufe ist in Abb. 4.21 dargestellt.

Wie auch schon im Kapitel 3.7.6, in welchem die Prüfvorschrift des herkömmlichen Abschervorganges erläutert wurde, beschrieben ist, gelangt man nach Abschluss der Vorgänge Initialbedingungen, Sättigung, B-Test und Konsolidation in die Schleife des Abschrens. Diese ist in der ersten Zeile in Abb. 4.18 dargestellt. Der Schleife untergeordnet ist ein Parametermenge-Knoten, in welchem ein Auswahlmenü definiert ist. Nachdem dieser Knoten aktiv wird, kann man zwischen konventionell kraftgesteuert, konventionell weggesteuert, mehrstufig weggesteuert oder Entlastungsvorgang auswählen. Die ersten beiden Auswahlpunkte (Schleife 2 und Schleife 3) wurden bereits in Kapitel 3.7.6 erläutert. Der dritte Auswahlpunkt ist auszuwählen, wenn ein mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt werden soll.

Nach Auswahl von „mehrstufig weggesteuert“ gelangt man zu Schleife 4. Diese bleibt aktiv, bis sämtliche ihrer Unterknoten ausgeführt sind, also bis der Abschervorgang der letzten Stufe des mehrstufigen Versuches abgeschlossen ist. Der Schleife untergeordnet ist eine Parametermenge, in welcher die Abschergeschwindigkeit, das Dehnungsinkrement, die Maximalverformung und die Aufzeichnungsraten definiert sind. Die Abschergeschwindigkeit ist anhand der ersten Konsolidation (manuell) zu ermitteln und bleibt für alle Stufen gleich. Das Dehnungsinkrement wird für die „Modul-Abbruchbedingung“ zur angenäherten Berechnung des Tangentenmoduls benötigt. Die Maximalverformung wird in der Regel auf 15% laut [1] eingestellt. Weiters werden zwei unterschiedliche Aufzeichnungsraten für die Datentabellen definiert, da beim Auswerten des Abschervorganges ein feingliedrigeres Datennetz als beim Konsolidationsvorgang benötigt wird.

Der nächste Knoten ist ein Kommando, welches offene Drainageventile fordert. Darunter ist ein lokale Kanäle-Knoten angeordnet, in welchem lediglich ein Platzhalter definiert ist, welcher den einzelnen Stufen eine Zahl zuweist. Diesem Knoten sind alle Datentabellen der Abschervorgänge und Konsolidationsvorgänge untergeordnet.

Die untergeordnete Datentabelle weist der Stufe 1 Scheren ein eigenes Textfile zu, welches mit der feineren Aufzeichnungsrate die Daten aufzeichnet. Der Datentabelle untergeordnet ist ein Sequenz-Knoten. Der Sequenz sind sechs weitere Knoten unterstellt, welche der Reihe nach aktiviert werden. Der Erste ist eine Parametermenge, in welcher zur Sicherheit noch einmal der Seitendruck der ersten Stufe definiert wird, falls dieser in der Konsolidationsphase falsch angegeben war. Sollte der Seitendruck angepasst werden müssen, wird dies im ersten untergeordneten Kommando ausgeführt. Im zweiten Kommando wird dem Platzhalter die Nummer 1 zugewiesen, sodass auch in der Datentabelle klar zu sehen ist, dass die Daten vom ersten Abschervorgang stammen. Die darunter angeordnete Meldung bestätigt, dass der richtige Seitendruck eingestellt ist.

Darunter ist wieder ein Sequenz-Knoten angeordnet. Diesem sind vier Knoten unterstellt. Der Erste ist ein Kommando, welches den Abschervorgang, also den Vorschub des Druckstempels mit der definierten Abschergeschwindigkeit startet. Dieser Kommando-Knoten ist mit einer Abbruchbedingung versehen, welche den Vorgang bei 0,25% Dehnung stoppt. Der Zweite ist ein lokale Kanäle-Knoten, in welchem die Berechnung des Initialmoduls definiert ist. Dieser ist ein

Sekantenmodul bei 0,25% Dehnung und wird berechnet, indem der aktuelle Wert der Deviatorspannung durch den aktuellen Wert der Dehnung dividiert wird. Der dritte Knoten ist ein Kommando, welches dem in den lokalen Kanälen berechneten Wert des Initialmoduls die Variable *Em_ini* zuweist und diese in der Konsole ausgibt. Der vierte Knoten ist eine Meldung, welche beschreibt, dass 0,25% Dehnung erreicht sind und dass der Initialmodul ausgegeben wird. Nachdem alle Knoten der Sequenz ausgeführt sind, beginnt die Schleife 4 (letztes Kommando in Abb. 4.18) zu laufen.

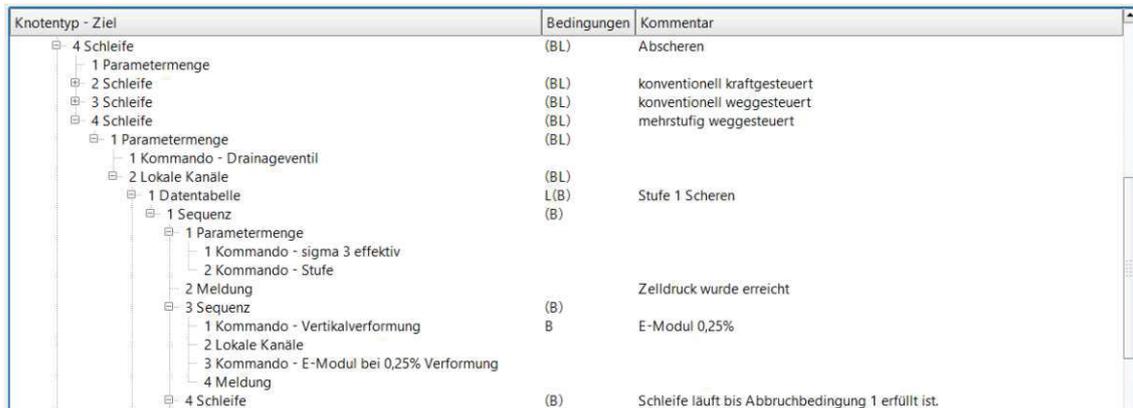


Abb. 4.18: mehrstufige Prüfvorschrift – Abscheren Stufe 1 (Teil 1)

Der in Abb. 4.20 dargestellte Abschnitt der Prüfvorschrift ist das Kernstück des mehrstufigen Triaxialversuches. Dabei wird während des Abscherens des Probekörpers laufend überprüft, ob der Tangentenmodul den definierten Wert unterschreitet (1. Abbruchkriterium) und ob die maximale Volumenkontraktion bereits erreicht wurde (2. Abbruchkriterium). Wird eine der Bedingungen erfüllt, so wird die Schleife beendet, was bedeutet, dass die Prüfvorschrift die Stufe 1 abbricht und zum nächsten Versuchsabschnitt voranschreitet.

Der erste Knoten in Abb. 4.20 ist eine Schleife, welche zu laufen beginnt, nachdem 0,25% Dehnung überschritten sind und welche ausgeführt wird, bis eine Abbruchbedingung erfüllt ist. Dieser untergeordnet sind eine Verzweigung und ein lokale Kanäle-Knoten. Zuerst wird der Verzweigungs-Knoten ausgeführt, welcher einen angenäherten Tangentenmodul und eine Volumenänderung berechnet. Anschließend wird in den lokalen Kanälen überprüft, ob eine Abbruchbedingung erfüllt ist oder nicht. Ist eine Bedingung erfüllt, wird der nächste Meldungs-Knoten ausgeführt. Ist keine Bedingung erfüllt, so beginnt die Schleife wieder von vorne zu laufen.

Die Verzweigung ist angeordnet, damit die beiden untergeordneten Knoten parallel ausgeführt werden. Dies ist zum einen ein Sequenz-Knoten und zum anderen ein Kommando-Knoten. Dem Sequenz-Knoten untergeordnet findet die Berechnung der Abbruchparameter statt, während gleichzeitig der Kommando-Knoten den Vorschub des Druckstempels ausführt. In den ersten lokalen Kanälen, welche der Sequenz untergeordnet sind, werden wie in Abb. 4.19 dargestellt, verschiedene Variablen definiert. Zuerst wird dem aktuellen Dehnungswert die Variable d_{eps_0} sowie dem aktuellen Volumen die Variable dV_0 zugeordnet. Weiters wird der Variable d_{eps_1} der Wert $d_{eps_0} + d_{eps}$ zugeordnet. Dabei steht d_{eps} für ein Dehnungsinkrement welches je nach Abschergeschwindigkeit verschieden groß gewählt werden kann.

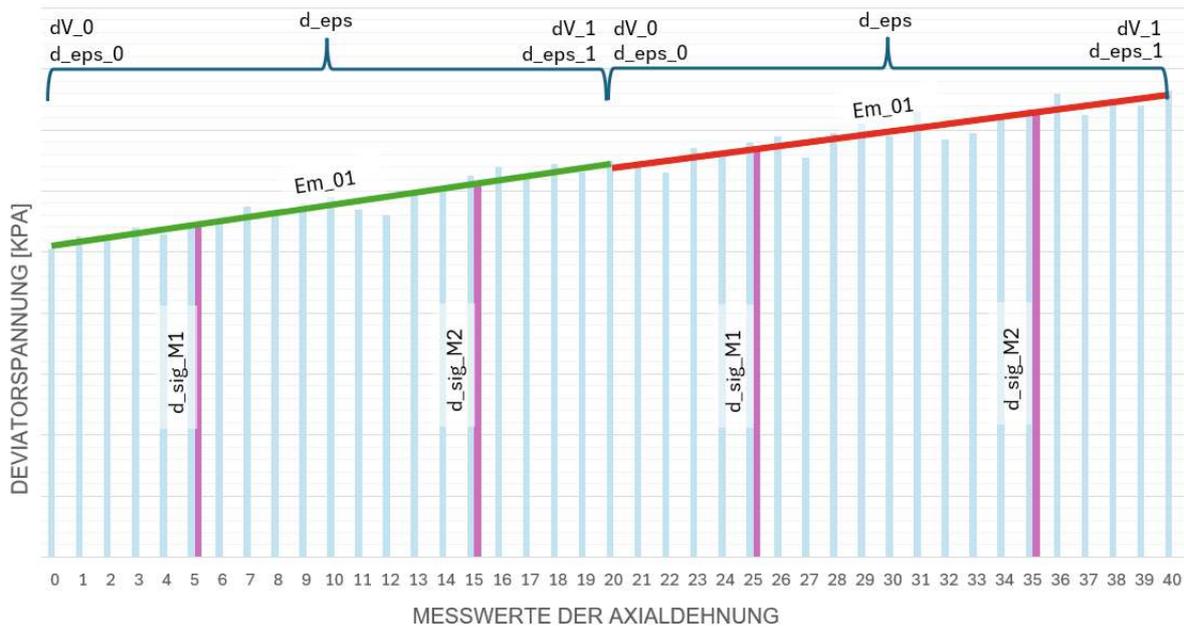


Abb. 4.19: Vorgangsweise zur Berechnung des Tangentenmodul

Innerhalb dieses Dehnungsinkrements d_{eps} werden wie in Abb. 4.19 dargestellt 21 Deviatorspannungswerte bestimmt. Aus den ersten 11 Werten sowie aus den zweiten 11 Werten wird jeweils ein Mittelwert bestimmt. Dieser Vorgang wird in der Prüfvorschrift mit den 21 Schleifen ausgeführt. Dabei werden die Schleifen der Reihe nach aktiv und nach einer Dehnung von $d_{eps}/20$ wieder abgebrochen. Dadurch wird durch die untergeordneten lokalen Kanäle und durch das Kommando der aktuelle Deviatorspannungswert, zum Zeitpunkt des Abbruchs der Schleife, ausgegeben. Diese Spannungswerte sind mit $d_{sig_d_0}$ bis $d_{sig_d_20}$ bezeichnet. In Schleife 11 wird der erste Mittelwert d_{sig_M1} und in Schleife 21 der zweite Mittelwert d_{sig_M2} berechnet. Weiters erfolgt in den lokalen Kanälen von Schleife 21 die angenäherte Berechnung des Tangentenmoduls Em_{01} sowie der aktuellen Volumenänderung. Der Tangentenmodul Em_{01} wird mit der Formel $(d_{sig_M2} - d_{sig_M1}) / (d_{eps}/2)$ berechnet.

Zur Berechnung der Volumenänderung wird in Schleife 21 der aktuelle Volumenänderungswert dV_1 bestimmt (Anmerkung: die in GEOsys definierte Variable dV gibt die Volumenänderung der Probe anhand der Volumenänderung der Zellflüssigkeit an) und somit kann die Volumenänderung dV_{01} mit der Formel $dV_1 - dV_0$ bestimmt werden. Ist diese positiv, so steigt die Volumenänderung und es herrscht demnach noch Volumenkontraktion. Ist diese jedoch negativ, so ist der Umkehrpunkt erreicht und die Probe beginnt sich aufzulockern.

Nachdem diese 21 Schleifen ausgeführt wurden, gibt es für dieses Dehnungsinkrement einen Tangentenmodul sowie eine Volumenänderung. Diese beiden Werte werden in den lokalen Kanälen (letzte lokale Kanäle in Abb. 4.20) einer Prüfung unterzogen. Dabei wird einerseits der Tangentenmodul Em_{01} dem Initialmodul Em_{ini} gegenübergestellt und andererseits die Volumenänderung dV_{01} überprüft. Die Ungleichungen lauten:

$$Em_{01} < (Em_{ini} / 25) \quad | \quad dV_{01} < (-0,02) \text{ ml}$$

Bei der zweiten Ungleichung wurde $< (-0,02)$ ml gewählt, damit die Streuung in den Messwerten etwas eliminiert wird. Dadurch soll erreicht werden, dass der Abbruch tatsächlich erst erfolgt, wenn die maximale Volumenkontraktion überschritten ist.

Ist keine der beiden Bedingungen erfüllt, so beginnt die Schleife 4, der erste Knoten in Abb. 4.20, von Neuem zu laufen. Ist jedoch eine der beiden Bedingungen erfüllt, so bekommt die Schleife 4 den Abbruchbefehl und die beiden vorletzten Knoten aus Abb. 4.20 werden ausgeführt. Die Meldung, dass die Stufe 1 abgeschlossen wurde, wird angezeigt. Der Kommando-Knoten fährt den Druckstempel wieder so weit zurück, dass eine Ausgangsdeviatorspannung von 10 kPa erreicht wird.

Nach dem Zurückfahren auf die Ausgangsdeviatorspannung kann der zweite Konsolidationsvorgang begonnen werden.



Abb. 4.20: mehrstufige Prüfvorschrift – Abscheren Stufe 1 (Teil 2)

Knotentyp - Ziel	Bedingungen	Kommentar
4 Schleife	(BL)	Abscheren
1 Parametermenge		
2 Schleife	(BL)	konventionell kraftgesteuert
3 Schleife	(BL)	konventionell weggesteuert
4 Schleife	(BL)	mehrstufig weggesteuert
1 Parametermenge		
1 Kommando - Drainageventil		
2 Lokale Kanäle	(BL)	
1 Datentabelle	L(B)	Stufe 1 Scheren
1 Sequenz	(B)	
1 Parametermenge		
1 Kommando - sigma 3 effektiv		
2 Kommando - Stufe		
2 Meldung		Zelldruck wurde erreicht
3 Sequenz	(B)	
1 Kommando - Vertikalverformung	B	E-Modul 0,25%
2 Lokale Kanäle		
3 Kommando - E-Modul bei 0,25% Verformung		
4 Meldung		
4 Schleife	(B)	Schleife läuft bis Abbruchbedingung 1 erfüllt ist.
1 Verzweigung	(B)	
1 Sequenz		
1 Lokale Kanäle		Berechnungsparameter werden sofort ausgegeben.
1 Kommando - deps0		
2 Kommando - deps1		
3 Kommando - dV0		
4 Kommando - dsigd0		
2 Schleife		Berechnungsparameter nach 5% des Verformungsinkrements ausgegeben.
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd1		
3 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd2		
4 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd3		
5 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd4		
6 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd5		
7 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd6		
8 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd7		
9 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd8		
10 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd9		
11 Schleife		Berechnungsparameter nach 50% des Verformungsinkrements ausgegeben.
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd10		
2 Kommando - dsigm1		
12 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd11		
13 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd12		
14 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd13		
15 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd14		
16 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd15		
17 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd17		
18 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd18		
19 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd19		
20 Schleife		
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd19		
21 Schleife		Berechnungsparameter nach 100% des Verformungsinkrements ausgegeben.
1 Lokale Kanäle		
1 Kommando - dsigd10		
2 Kommando - dsigm2		
3 Kommando - E-Modul aktuell zw. 0_1		
4 Kommando - dV1		
5 Kommando - dV_01		
2 Kommando - Vertikalverformung	B	Abbruchbedingung Stufe 1
2 Lokale Kanäle		
5 Meldung		
6 Kommando - Deviatorspannung		

Abb. 4.21: mehrstufige Prüfvorschrift – Abscheren Stufe 1 komplett

4.6.3 Mehrstufige Prüfvorschrift – Stufe 2

Nachdem der erste Abschervorgang abgebrochen und die Ausgangsdeviatorspannung erreicht wurden, kann die Erhöhung des Seitendruckes auf die zweite Stufe erfolgen. In Abb. 4.22 ist dieser Vorgang in der Prüfvorschrift abgebildet.

Der Abschnitt beginnt mit der Zuweisung einer eigenen Datentabelle für den zweiten Konsolidationsvorgang. Darunter ist ein Sequenz-Knoten angeordnet, welcher die untergeordneten Knoten der Reihe nach ausführt. Der erste untergeordnete Knoten ist eine Parametermenge, in welcher der Seitendruck $\sigma_{3,eff}$ der zweiten Stufe definiert ist.

Der Parametermenge unterstellt befinden sich zwei Kommando-Knoten. Das erste Kommando gibt dem Druckerzeuger für den Zelldruck den Befehl den Zelldruck auf den in der Parametermenge definierten Wert $\sigma_{3,eff}$ einzustellen. Nachdem die Anpassung des Zelldruckes abgeschlossen ist, ordnet das zweite Kommando dem Platzhalter für die Stufe den Wert 2 zu. Zuletzt wird eine Meldung ausgegeben, dass die Konsolidation im Gange ist und dass „weiter“ geklickt werden soll, sobald die Konsolidation abgeschlossen ist.

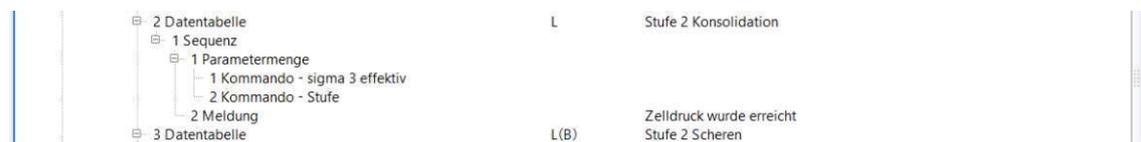


Abb. 4.22: mehrstufige Prüfvorschrift – Konsolidation Stufe 2

Nachdem die Konsolidation abgeschlossen ist, wird der zweite Abschervorgang gestartet. Deswegen Prüfvorschrift ist in Abb. 4.23 dargestellt. Der Ablauf des zweiten Abschervorganges ist zum Großteil ident mit jenem des Ersten. Im Unterschied zum Ersten, wird beim zweiten Abschervorgang der Initialmodul nicht neuerlich berechnet. Die Prüfvorschrift beginnt demnach sofort nach Start des zweiten Abschervorganges mit der Überprüfung der Abbruchkriterien. Weiters wird beim ersten Abbruchkriterium das Verhältnis zwischen Initialmodul und Tangentenmodul aufgrund der fortgeschrittenen Störung des Probekörpers von 25 auf 15 reduziert. Die Abbruchkriterien für die Stufe 2 lauten demnach:

$$Em_{01} < (Em_{ini} / 15) \quad | \quad dV_{01} < (-0,02) \text{ ml}$$

Bis auf diese Unterschiede funktioniert die Prüfvorschrift exakt gleich wie jene des ersten Abschervorganges.

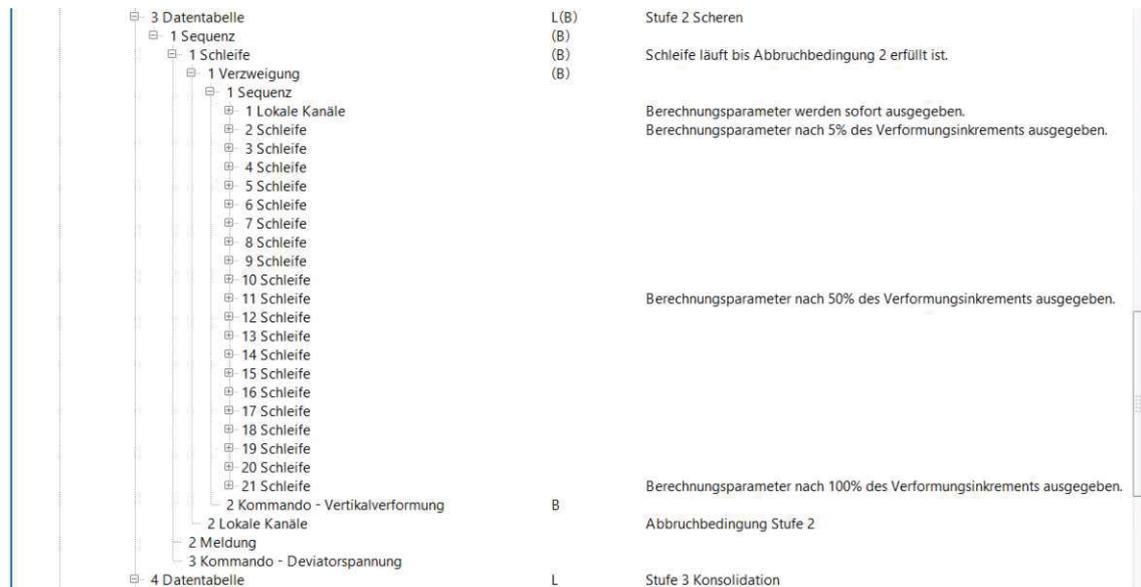


Abb. 4.23 mehrstufige Prüfvorschrift – Abschere Stufe 2

4.6.4 Mehrstufige Prüfvorschrift – Stufe 3

Nach Abbruch des zweiten Abschervorganges wird der Seitendruck auf die dritte Stufe erhöht. Dieser Vorgang ist ident mit jenem, welcher den Seitendruck auf die zweite Stufe bringt, wie in Abb. 4.24 zu sehen ist.

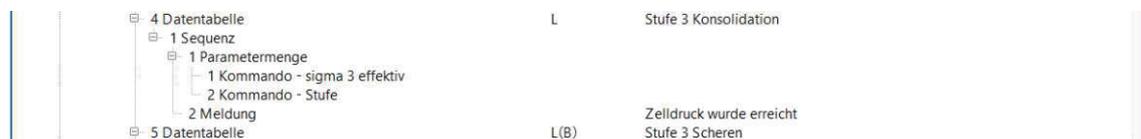


Abb. 4.24: mehrstufige Prüfvorschrift – Konsolidation Stufe 3

In Abb. 4.25 sind der Abschervorgang der dritten Stufe sowie der Entlastungsvorgang dargestellt. Grundsätzlich erfolgt bei der dritten Stufe kein Abbruch bis die Maximaldehnung erreicht ist. Aus Gründen, welche die Auswertung des mehrstufigen Triaxialversuches betreffen (dies wird in Kapitel 4.7 ersichtlich), sind auch in der dritten Stufe Abbruchkriterien programmiert. Diese beenden den Abschervorgang jedoch nicht, sondern es wird lediglich jeweils eine eigene Datentabelle vor und nach Erreichen des theoretischen Abbruchs angelegt.

In Datentabelle 5 in Abb. 4.25 erfolgt der dritte Abschervorgang, welcher exakt gleich wie der zweite Abschervorgang funktioniert. Der letzte Knoten, welcher Datentabelle 5 untergeordnet ist, gibt die Meldung, dass eine Abbruchbedingung erfüllt ist. Zeitgleich wird in Datentabelle 6 der Abschervorgang fortgesetzt. Dazu ist eine Sequenz mit zwei Unterknoten angeordnet. Der erste Unterknoten ist ein Kommando, welches den Druckstempel bis zu der definierten Maximalverformung bewegt. Der zweite Unterknoten gibt die Meldung aus, dass die Maximaldehnung erreicht wurde und dass der Abschervorgang beendet ist.

Nachdem dieser Meldungs-Knoten ausgeführt wurde, gelangt man zurück in ein Auswahlmenü, in welchem der Schritt „Entlastung“ ausgewählt werden kann. Wird dieser ausgewählt, so wird durch das Kommando-Deviatorspannung der Druckstempel bis auf einen Wert von 10 kPa

zurückgefahren. Das Kommando-Drainageventil fordert auf, die Ventile zu öffnen. Darunter ist eine Verzweigung mit zwei Unterknoten angeordnet. Diese beiden Kommandos fahren den Zell- und den Porendruck gleichzeitig auf einen geringen Ausgangswert zurück. Zuletzt wird eine Meldung ausgegeben, dass der Versuch beendet ist.



Abb. 4.25: mehrstufige Prüfvorschrift – Abscheren Stufe 3 und Entlastung

4.7 Excel-Tool zur Auswertung der mehrstufigen Triaxialversuche

Parallel zur Erarbeitung der Prüfvorschrift für den mehrstufigen Triaxialversuch wurde auch ein Excel-Tool zur Auswertung der Rohdaten erstellt. Für den konventionellen Triaxialversuch war bereits ein Auswertungstool vorhanden. An dieses angelehnt, wurde das Auswertungstool für den mehrstufigen Versuch erarbeitet.

Ist ein Versuch abgeschlossen, werden die Rohdaten aus einer von GEOsys angelegten Textdatei in eine Exceldatei konvertiert. In dieser Exceldatei wird für jeden in der Prüfvorschrift angelegten Datentabelle-Knoten ein separates Tabellenblatt angelegt.

Das Auswertungstool ist so aufgebaut, dass die Rohdaten aus der Exceldatei kopiert und in die jeweiligen vorbereiteten Blätter des Auswertungstools, welche in Abb. 4.26 dargestellt sind, eingefügt werden. Zu Beginn der Auswertung müssen demnach die eingefärbten Blätter „Scheren Stufe 1-3“ und „Konsolidation Stufe 1-3“ mit den Versuchsdaten befüllt werden.



Abb. 4.26: Excel-Tabellenblätter des Auswertungstools

Wird ein Material untersucht, bei welchem die maximal zulässige Abschergeschwindigkeit auf Basis des Konsolidierungsvorganges noch ermittelt werden muss, so kann diese ebenfalls mit dem Auswertungstool bestimmt werden. Dazu müssen nach der ersten Konsolidationsphase die Rohdaten in eine Exceldatei exportiert werden und im Auswertungstool in das Blatt „Konsolidation Stufe 1“ eingefügt werden. Im Tabellenblatt „Auswertung“ wird anschließend ein Diagramm erstellt, welches die Vertikalverformung über den Logarithmus der Zeit aufträgt. An diesen Graphen müssen dann händisch Tangenten an die linearen Abschnitte angelegt werden. Eine Tangente wird an den Wendepunkt und die andere Tangente an den Abschnitt der Sekundärzusammendrückung gelegt. Der Schnittpunkt ergibt jenen Punkt, an welchem theoretisch 100% Primärzusammendrückung erreicht sind. [12]



Abb. 4.27: beispielhafte Bestimmung der Primärkonsolidationszeit t_{100}

Nachdem die Zeit t_{100} mit Hilfe der Abb. 4.27 ermittelt wurde, muss diese in die Tabelle, welche in Abb. 4.28 dargestellt ist, eingetragen werden. In dieser Tabelle ist die Formel zur Berechnung der maximal zulässigen Abschergeschwindigkeit anhand der Konsolidationszeit laut ÖNORM EN ISO 17892-9 [1] hinterlegt. Es wird demnach ein Wert für die maximale Abschergeschwindigkeit v_{\max} ausgegeben, welche im zweiten gelben Feld angepasst werden kann. Das dritte gelbe Feld in Abb. 4.28 gibt Vorschläge für die Auswahl des Dehnungsinkrementes, welches zur angenäherten Berechnung des Tangentenmoduls (Abbruchbedingung) verwendet wird.

Konsolidation				
Berechnung Abschergeschwindigkeit nach Konsolidationsdauer				
H_c	164.23	[mm]		
ϵ_{vf}	0.15	[]		
F	34	[]		
t_{100}	1.60	[h]		
v_{\max}	0.03019	[mm/min]	0.00050316	
v_{\max}	0.01838	0.015	[%/min]	
abgeschätzte Scherdauer	16.7	[h]		0.69 d
Dehnungsinkrement zwischen	0.06	0.1	[%]	
	0.30			

Abb. 4.28: Berechnung der maximal zulässigen Abschergeschwindigkeit

Ist der mehrstufige Versuch abgeschlossen und sind die Rohdaten in die entsprechenden Tabellenblätter eingefügt worden, so kann im Tabellenblatt „Auswertung“ die weitere Bearbeitung durchgeführt werden. Dazu müssen zu Beginn die Allgemeinen Versuchsdaten in die gelben Felder, welche in Abb. 4.29 dargestellt sind, eingetragen werden. Rechterhand werden Spannungs-Dehnungs-Kurven sowie Volumen-Axialdehnungs-Kurven dargestellt. In den gelben Feldern neben „Index Auswahl“ können die Punkte der maximalen Deviatorspannung der einzelnen Stufen, falls dies notwendig sein sollte, bearbeitet bzw. frei gewählt werden.

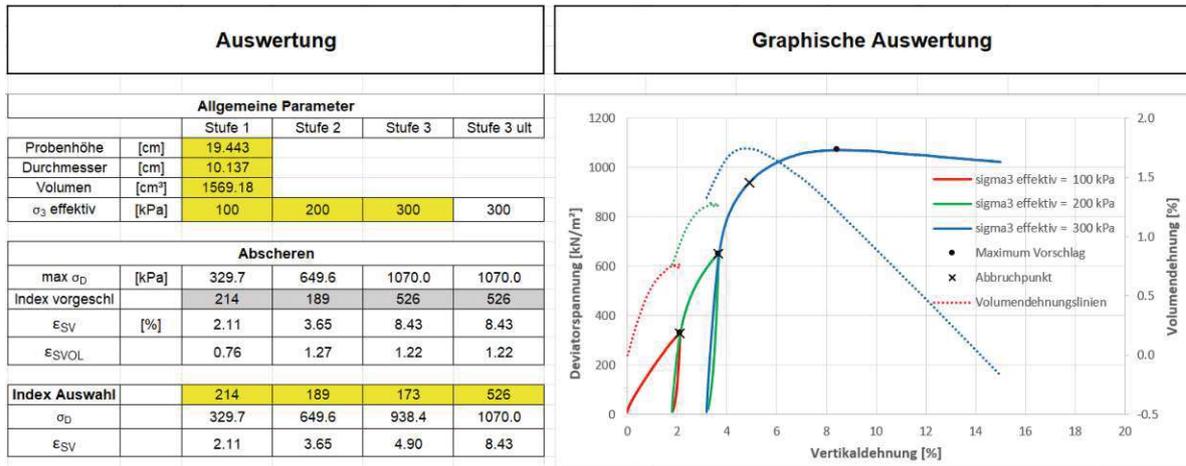


Abb. 4.29: Auswertung mehrstufiger Triaxialversuch

Weiters werden anhand der maximalen Deviatorspannungen und der effektiven Seitendruckspannungen, bei den jeweiligen Stufen, Kreisgleichungen ermittelt, anhand welcher die *Mohr'schen* Spannungskreise gezeichnet werden. Wie in Abb. 4.30 dargestellt, wird eine strichlierte Gerade an die drei *Mohr'schen* Kreise angelegt, welche mittels den maximalen Spannungswerten zum Zeitpunkt des Abbruchs der jeweiligen Stufe konstruiert wurden. Parallel dazu wird eine durchgezogene Linie an den größten *Mohr'schen* Kreis, welcher mittels der maximalen Spannung zum Zeitpunkt des Versagens konstruiert wurde, angelegt. Die Parallelverschiebung erfolgt durch Anpassung der Kohäsion im zweiten gelben Feld von Abb. 4.30.

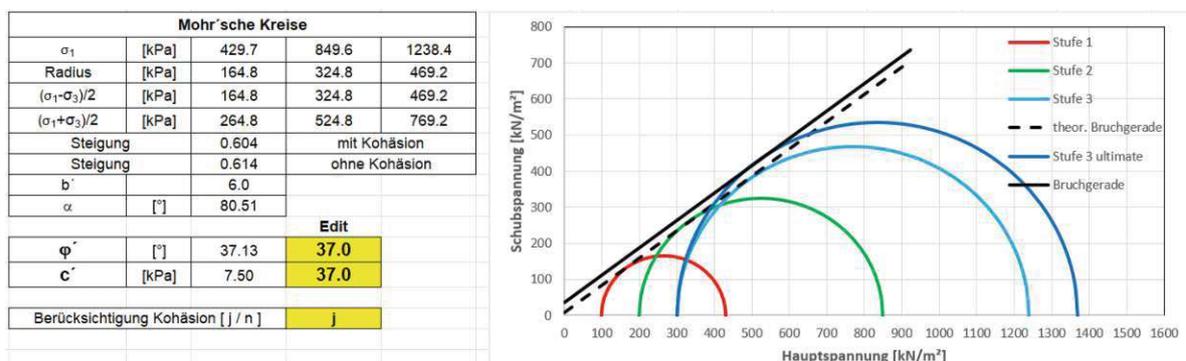


Abb. 4.30: Beispiel zur Auswertung eines mehrstufigen Triaxialversuches mit dem Auswertungstool

Zuletzt müssen im Tabellenblatt „Ergebnisblatt“ die Versuchsdaten sowie Bilder der untersuchten Probe vor dem Versuch, sowie nach dem Versuch eingefügt und das Protokoll gedruckt werden.

5 Laborversuche – Übersicht und vorbereitende Arbeiten

Um ein geeignetes (aufbereitetes) Material für die Durchführung der mehrstufigen Triaxialversuche zu finden und um Richtwerte für die Versagensdehnung und die Versagensspannung zu erhalten, wurden im Vorfeld der Triaxialversuche Proctorversuche und einaxiale Druckversuche durchgeführt.

5.1 Probenmaterialien und Versuchsübersicht

In Abb. 5.1 ist eine Übersicht über die Probematerialien und deren Bodenbeschreibung dargestellt.

Materialbezeichnung	Mischungsverhältnis	Bodenbeschreibung
998_1	Ton/Schluff gebrochen zu kleinen Chips < 4mm Einbauwassergehalt: 16,3%	n.v.
998_2	Ton/schluff gebrochen zu kleinen Chips und abgeseibt < 1mm Einbauwassergehalt: 16,3%	sa' cl Si, feinkörnig
998_3	Material 998_2 (1/3) gemischt mit Normsand (2/3) Einbauwassergehalt: 10%	cl' si Sa, gemischtkörnig
998_4	Material 998_2 (1/4) gemischt mit gut gestuftem Siebgut 0-2mm (3/4) Einbauwassergehalt: 7.5%	cl' si Sa, gemischtkörnig
998_5	grobkörniges, gut gestuftes Material Einbauwassergehalt: 10.5%	cl' si sa* Gr, gemischtkörnig
998_6	Material 998_2 (2/5) gemischt mit gesiebttem grobkörnigem Material (3/5) Einbauwassergehalt: 12.5%	cl' si Sa/Gr, gemischtkörnig

Abb. 5.1: Probenmaterialübersicht

In Abb. 5.2 ist eine Übersicht über sämtliche getätigte Laborversuche dargestellt. Anhand der Übersicht können auch die einzelnen Arbeitsschritte zur Entwicklung der Prüfvorschrift nachvollzogen werden.

Arbeits-schritte	Material-bezeichnung	Anmerkungen	Einaxialer Druckversuch	konventioneller Triaxialversuch	mehrstufiger Triaxialversuch
1	998_1	erster Triaxialversuch (Umgang mit der Versuchsanlage und Versuchssetup erlernen)	3	1 ($\sigma_3=100$ kPa) drainiert (CID)	-
2	998_3	Material schlecht geeignet für MSV --> siehe Spannungs-Dehnungs-Kurve im einaxialen DV (Abb. 5.9)	1	-	-
3	998_4	Material schlecht geeignet für MSV --> siehe Spannungs-Dehnungs-Kurve im einaxialen DV (Abb. 5.9)	1	-	-
4	998_2	erster mehrstufiger Triaxialversuch mit manuellem Abbruch der einzelnen Stufen durchgeführt	1	1 ($\sigma_3=500$ kPa) drainiert (CID)	1 ($\sigma_3=100\rightarrow 300\rightarrow 500$) drainiert (CID)
Prüfvorschrift für den mehrstufigen Triaxialversuch in der Rohfassung erstellt					
5	998_5	Erarbeitung der automatisierten mehrstufigen Prüfvorschrift durch Durchführung mehrerer mehrstufiger Versuche und Testung und Anpassung der Prüfvorschrift	-	3* ($\sigma_3=100/200/300$ kPa) drainiert (CID)	4 ($\sigma_3=100\rightarrow 200\rightarrow 300$) ($\sigma_3=100\rightarrow 200\rightarrow 300$) ($\sigma_3=100\rightarrow 200\rightarrow 300$) ($\sigma_3=100\rightarrow 200\rightarrow 300$) drainiert (CID)
Prüfvorschrift für mehrstufigen Triaxialversuch angepasst und erprobt für das Kriterium "maximale Volumenkontraktion"					
6	998_6	Probleme mit "backpressure" während dem Versuch; Probenmaterial aufgrund der breiigen Konsistenz schwierig in der Handhabung	-	-	1 ($\sigma_3=100\rightarrow 200\rightarrow$ Abbruch) drainiert (CID)
7	998_2	Versuche mit "backpressure" durchgeführt; Prüfvorschrift mit automatisierten Abbruchkriterien getestet und Ergebnisse verglichen	-	3** ($\sigma_3=100/200/300$ kPa) undrainiert (CIU)	1** ($\sigma_3=100\rightarrow 200\rightarrow 300$) undrainiert (CIU)
Prüfvorschrift für mehrstufigen Triaxialversuch angepasst; "Abbruchmodulkriterium" erprobt und Ergebnisse verglichen					

* Versuchsergebnisse bereits vorhanden; Versuche nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt

**Versuch mit Gegendruck von 700 kPa durchgeführt

Abb. 5.2: Versuchsübersicht und Arbeitsschritte zur Entwicklung der Prüfvorschrift

5.2 Herstellung der Probekörper

Zu Beginn wurde ein getrocknetes, gebrochenes feinkörniges Material herangezogen. Dieses war im Labor reichlich vorhanden und war sehr gut einbaubar und formbar. Es wurde mit der Probennummer 998_1 bezeichnet. Mit diesem Material wurde ein Einpunkt-Proctorversuch durchgeführt, um einen Richtwert für die Proctordichte zu erhalten. Der Versuch wurde mit dem kleinen Proctorzylinder und dem kleinen Proctorhammer durchgeführt, wobei drei Schichten eingebaut wurden, welche mit je 25 Schlägen verdichtet wurden. Der Wassergehalt wurde davor auf 16% eingestellt, wobei etwa 1% Restfeuchte im Material vorhanden waren und 15% zugegeben wurden. Die damit erhaltene Proctordichte belief sich, wie in Abb. 5.3 dargestellt, auf eine Trockendichte von $1,847 \text{ g/cm}^3$.

				Lab. Nr.:	998		
Bearbeiter: Döller				Datum:	30.10.2023		
BESTIMMUNG DER EINFACHEN PROCTORDICHTE							
Geräteabmessungen und Versuchsbedingungen gem. ÖN B 4418 (die Zahlen in Klammern gelten für den mod. Proctorversuch):							
Gerät	Durchmesser des Proctorzylinders d_1 [mm]:	Volumen [cm ³]	Probenmenge [kg]	Zulässiges Größtkorn [mm]	höchstzulässige Massenanteile des Überkorns [%]	Anzahl der Schläge pro Schicht	Anzahl der Schichten
<input checked="" type="checkbox"/> klein	100	942,5	2kg	20	20	25 (25)	3 (5)
<input type="checkbox"/> mittel	150	2208,9	6,5kg	31,5	25	22 (59)	3 (5)
<input type="checkbox"/> groß	250	9817,5	20-22kg	63	30	22 (59)	3 (5)
<input type="checkbox"/> Olympia	60	353,0	800g	8	15	24	3
Berücksichtigung des Überkorns:							
Gtr, \bar{u} [g] =		Gtr, ges. [g] =		$\bar{u} = \text{Gtr, } \bar{u} / \text{Gtr, ges.} =$			
$\rho_{s, \bar{u}}$ [g/cm ³] =							
Messung:							
998_1 1. Punkt Proc.	Gf + Pr [g] =	9439,5	Gf + T [g] =	2651,6	w [%] =	16,30 ✓	
	Pr [g] =	7420,5	Gtr + T [g] =	2368,8	ρ_r [g/cm ³] =	2,148 ✓	
	Gf [g] =	2019,0	T [g] =	633,9	ρ_d [g/cm ³] =	1,847 ✓	
			Gtr [g] =	1734,9	v		
998_3 2. Punkt	Gf + Pr [g] =	9864,7	Gf + T [g] =	2499,9	w [%] =	10,11	
	Pr [g] =	7420,2	Gtr + T [g] =	2304,0	ρ_r [g/cm ³] =	2,28	
	Gf [g] =	2144,2	T [g] =	360,2	ρ_d [g/cm ³] =	2,07	
			Gtr [g] =	1943,8			
998_4 3. Punkt	Gf + Pr [g] =	9869,8	Gf + T [g] =	2491,4	w [%] =	8,0	
	Pr [g] =	7420,1	Gtr + T [g] =	2333,0	ρ_r [g/cm ³] =	2,28	
	Gf [g] =	2149,7	T [g] =	345,5	ρ_d [g/cm ³] =	2,11	
			Gtr [g] =	1987,5			
4. Punkt	Gf + Pr [g] =		Gf + T [g] =		w [%] =		
	Pr [g] =		Gtr + T [g] =		ρ_r [g/cm ³] =		
	Gf [g] =		T [g] =		ρ_d [g/cm ³] =		
			Gtr [g] =				
5. Punkt	Gf + Pr [g] =		Gf + T [g] =		w [%] =		
	Pr [g] =		Gtr + T [g] =		ρ_r [g/cm ³] =		
	Gf [g] =		T [g] =		ρ_d [g/cm ³] =		
			Gtr [g] =				

Abb. 5.3: Protokoll Proctorversuch

Im nächsten Schritt wurde das Material mit der Probennummer 998_1 in einen Zylinder mit einem Durchmesser von 67 mm und einer Höhe von ca. 140 mm eingebaut und mit jener Energie verdichtet, die der Proctorenergie entsprach. Um dies zu erreichen, musste das Material laut Abb. 5.4 in vier Schichten und mit je zehn Schlägen in die Probeform eingebaut werden. Von diesen Probekörpern wurde vier Stück hergestellt. Mit diesen Proben wurden anschließend einaxiale Druckversuche durchgeführt.

Projekt/Probe		SOLL-Dichte			
998	1+2	Proctordichte	ρ_{Pr} [kg/dm ³]	w opt [%]	ρ [kg/dm ³]
		100%	1.847	16,3%	2.148

Prüfkörper D 67 mm /H 140 mm

Verdichtung mit STANDARD PROCTOR Energie								Einbaumasse	
Durchmesser	Höhe	Schichten	Schichthöhe	Fläche	Volumen	SOLL-Feuchtdichte	rechn. Masse je Lage	gew. Masse je Lage	Mindestmasse +20%
d [cm]	h [cm]	n	h1 [cm]	A = n.m.g.h [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/dm ³]	m [g]	m [g]	mges [kg]
6.70	14.10	4	3.53	0.0035	0.0001	2.15	267	280	1.3
Schlagzahl n			Masse m[kg]	Fallhöhe hf [m]	Arbeit A = n.m.g.hf [Nm]	Arbeit / Volumen [MNm / m ³] (IST)	(SOLL)	4,9%	
10			2,5	0,3	73,6	0,592	0,60		

**Einbau mit 4 Schichten je 280 g ,
Lagestärke ca. 3,5 cm (= 14,1 cm)
mit je 10 Schlägen Proctorhammer 2,5 kg**

Materialaufbereitung			
Vorgetr. Masse [g]	3000		
Restwassergehalt	1,3%	enth. Wasser [g]	39
Fehlender Wassergehalt	15,0%	erforderliche Wasserezugabe [g]	444
IST Trockenmasse [g]	2962	Feuchtmasse [g]	3444

Abb. 5.4: Einbaurezept für die Proben 998_1 und 998_2 zur Herstellung von Prüfkörpern mit 67 mm Durchmesser und ca. 140 mm Höhe

Mit derselben Vorgehensweise wurden die Probematerialien 998_3 und 998_4 untersucht. Die Ergebnisse der Proctordichten sind in Abb. 5.3 zu sehen. Bei Material 998_2 wurde kein Einpunkt-Proctorversuch durchgeführt und stattdessen mit der Rezeptur von 998_1 gearbeitet.

Aus den Materialien 998_2, 998_3 und 998_4 wurden anschließend wieder Probekörper gemäß dem in Abb. 5.4, Abb. 5.5 und Abb. 5.6 angegebenen Einbaurezept mit 67 mm Durchmesser und ca. 140 mm Höhe hergestellt. Mit diesen Probekörpern wurden wiederum einaxiale Druckversuche durchgeführt.

Projekt/Probe		SOLL-Dichte			
998	3	Proctordichte	ρ_{Pr} [kg/dm ³]	w opt [%]	ρ [kg/dm ³]
		100%	2.07	10.0%	2.277

Prüfkörper D 67 mm /H 140 mm

Verdichtung mit STANDARD PROCTOR Energie								Einbaumasse	
Durchmesser	Höhe	Schichten	Schichthöhe	Fläche	Volumen	SOLL-Feuchtdichte	rechn. Masse je Lage	gew. Masse je Lage	Mindestmasse +20%
d [cm]	h [cm]	n	h1 [cm]	A = n.m.g.h [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/dm ³]	m [g]	m [g]	mges [kg]
6.70	14.10	4	3.53	0.0035	0.0001	2.28	283	300	1.4
Schlagzahl n			Masse m[kg]	Fallhöhe hf [m]	Arbeit A = n.m.g.hf [Nm]	Arbeit / Volumen [MNm / m ³] (IST)	(SOLL)	6.0%	
10			2,5	0,3	73,6	0,592	0,60		

**Einbau mit 4 Schichten je 300 g ,
Lagestärke ca. 3,5 cm (= 14,1 cm)
mit je 10 Schlägen Proctorhammer 2,5 kg**

Materialaufbereitung			
Vorgetr. Masse [g]	3000		
Restwassergehalt	1.3%	enth. Wasser [g]	39
Fehlender Wassergehalt	8.7%	erforderliche Wasserezugabe [g]	258
IST Trockenmasse [g]	2962	Feuchtmasse [g]	3258

Abb. 5.5: Einbaurezept für die Probe 998_3 zur Herstellung von Prüfkörpern mit 67 mm Durchmesser und ca. 140 mm Höhe

Projekt/Probe		SOLL-Dichte			
998	4	Proctordichte	pPr [kg/dm ³]	w opt [%]	ρ [kg/dm ³]
		100%	2.11	7.5%	2.268

Prüfkörper D 67 mm /H 140 mm

Verdichtung mit STANDARD PROCTOR Energie								Einbaumasse	
Durchmesser	Höhe	Schichten	Schichthöhe	Fläche	Volumen	SOLL-Feuchtdichte	rechn. Masse je Lage	gew. Masse je Lage	Mindestmasse +20%
d [cm]	h [cm]	n	h1 [cm]	A = n.m.g.h [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/dm ³]	m [g]	m [g]	mges [kg]
6.70	14.10	4	3.53	0.0035	0.0001	2.27	282	300	1.4
Schlagzahl n			Masse m[kg]	Fallhöhe hf [m]	Arbeit A = n.m.g.hf [Nm]	Arbeit / Volumen [MNm / m ³] (IST)		6.4%	
10			2.5	0.3	73.6	0.592	0.60		

**Einbau mit 4 Schichten je 300 g ,
Lagestärke ca. 3.5 cm (= 14.1 cm)
mit je 10 Schlägen Proctorhammer 2.5 kg**

Materialaufbereitung			
Vorgetr. Masse [g]	3000		
Restwassergehalt	1.3%	enth. Wasser [g]	39
Fehlender Wassergehalt	6.2%	erforderliche Wasserzugabe [g]	184
IST Trockenmasse [g]	2962	Feuchtmasse [g]	3184

Abb. 5.6: Einbaurezept für die Probe 998_4 zur Herstellung von Prüfkörpern mit 67 mm Durchmesser und ca. 140 mm Höhe

Mit den Materialien 998_5 und 998_6 wurden aus Zeitgründen keine Proctorversuche und einaxialen Druckversuche durchgeführt. Die Herstellung der Probekörper mit den zugehörigen Einbaurezepten ist in der jeweiligen Versuchsbeschreibung in Kapitel 6.5 und Kapitel 6.6 beschrieben.

5.3 Einaxiale Druckversuche

5.3.1 Theoretische Grundlagen

Die Durchführung eines einaxialen Druckversuches ist in der ÖNORM EN ISO 17892-7 [10] geregelt. Der Versuch ist ein schneller Zusammendrückungsversuch mit unbehinderter Seitendehnung. Demnach sind die Hauptspannungen $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Es werden meist zylindrische Probekörper, welche laut Norm ein Verhältnis $H/D = 1,8-2,5$ haben müssen, in eine Prüfpresse eingebaut. Die Druckplatten der Prüfpresse müssen planparallel zueinander sein, senkrecht zur Druckrichtung stehen und dürfen während des Versuches nicht verkippen. Der Probekörper wird zentrisch in der Prüfpresse platziert und mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit in axialer Richtung belastet. Die empfohlene Vorschubgeschwindigkeit liegt laut ÖNORM EN ISO 17892-7 [10] bei 1% der Anfangshöhe des Probekörpers pro Minute. Bei verkitteten oder stabilisierten Böden mit einer erwarteten Bruchstauchung kleiner als 4% ist eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,2% der Anfangshöhe des Probekörpers pro Minute einzuhalten. Der Versuch ist beendet, wenn entweder der Bruch eingetreten ist, was bedeutet, dass die gemessene Axialkraft nicht weiter ansteigt oder wenn die Stauchung der Probe einen Wert von 20% erreicht hat.

Während des Versuches werden die axiale Druckkraft F und die Änderung der Probenhöhe Δh gemessen und aufgezeichnet. Die Daten werden in Form eines Druck-Stauchungs-Diagrammes aufgetragen. Die einaxiale Druckfestigkeit q_u kann unter Annahme einer volumenkonstanten Verformung anhand folgender Formel und Abb. 5.7 berechnet werden: [4]

$$q_u = \sigma_{max} = \frac{F}{A_0} \cdot (1 - \varepsilon) ; \quad \varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$$

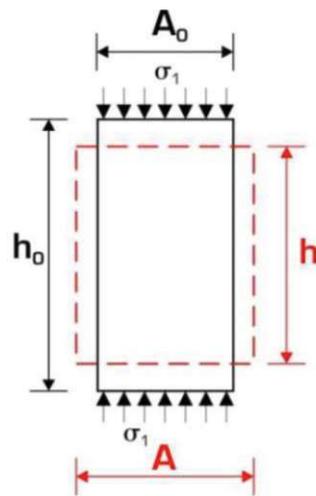


Abb. 5.7: Einaxialer Druckversuch; schwarz: Anfangsgeometrie; rot: Geometrie während des Versuches [4]

In Abb. 5.8 sind verschiedene Brucharten des einaxialen Druckversuches dargestellt. Damit das Material optimal für mehrstufige Triaxialversuche geeignet ist, sollte die Spannungs-Dehnungs-Kurve und die Bruchform dem plastischen Bruch entsprechen. Ziel der in dieser Arbeit durchgeführten einaxialen Druckversuche war es demnach, Materialien zu identifizieren, welche eine solche plastische Bruchform aufweisen.

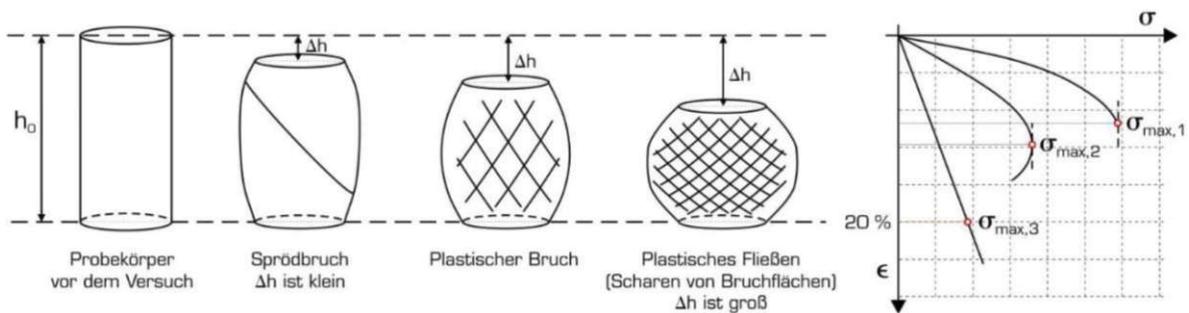


Abb. 5.8: Brucharten beim Einaxialen Druckversuch [4]

5.3.2 Versuchsergebnisse

In einer ersten Versuchsserie wurden drei Druckversuche mit den Probekörpern aus dem Material 998_1 durchgeführt. Dabei stellte der erste Versuch einen markanten „Ausreißer“ dar, da die einaxiale Druckfestigkeit bei diesem etwa um 1/3 höher war als jene der Versuche zwei und drei. Eine Erklärung für diesen „Ausreißer“ könnte die längere Standzeit sein, da der Probekörper nach der Herstellung für längere Zeit aufbewahrt wurde, dadurch vermutlich der Wassergehalt gesunken ist und somit die Konsistenz verändert wurde. Demnach wurde der erste Versuch ausgeschlossen und nur die Ergebnisse der Versuche zwei und drei betrachtet.

Aus den Materialien 998_2, 998_3 und 998_4 wurde jeweils nur ein Probekörper hergestellt. Die Probekörper wurden anhand der jeweiligen Einbaurezepte so eingebaut, dass eine Proctordichte von 100% erreicht wurde. Anschließend wurde jeweils ein einaxialer Druckversuch durchgeführt.

In Abb. 5.9 sind die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche der fünf Probekörper aus den jeweiligen Versuchen dargestellt. In Abb. 5.10 ist der Probekörper aus dem Versuch 998_2 nach dem einaxialen Druckversuch dargestellt.

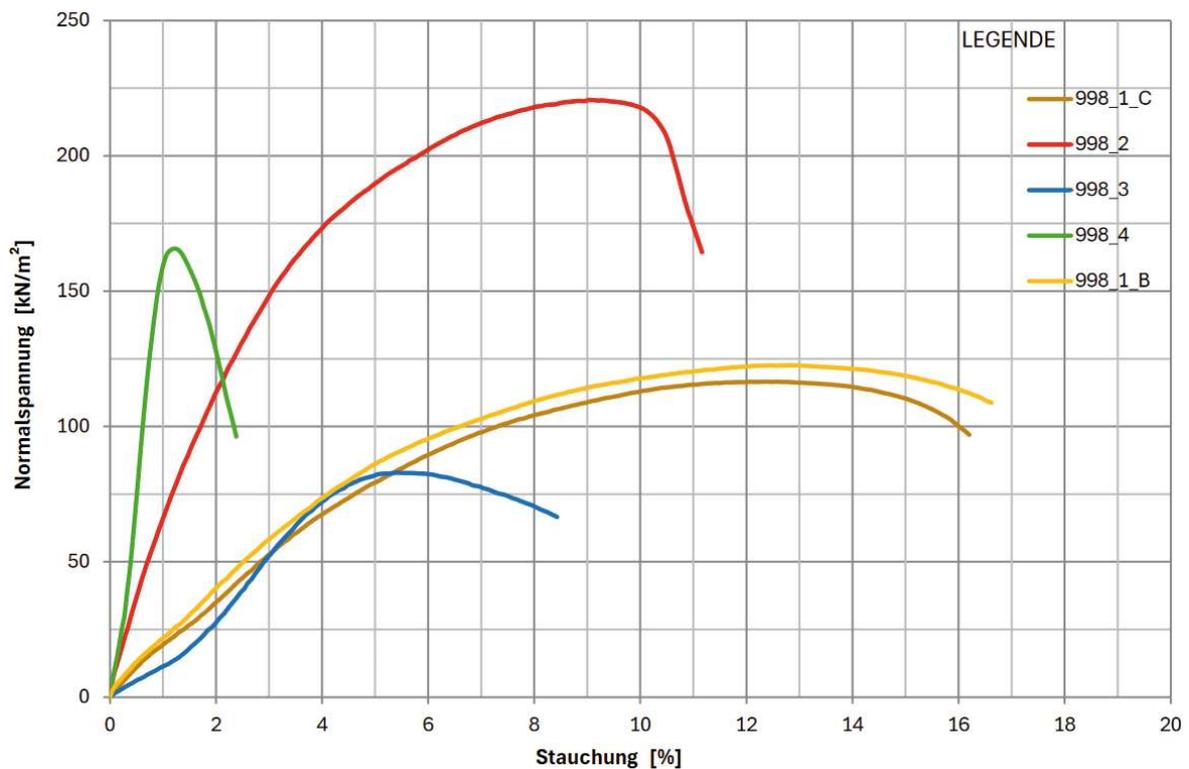


Abb. 5.9: Spannungs-Dehnungs-Kurven der einaxialen Druckversuche

Damit der mehrstufige Triaxialversuch bestmöglich erarbeitet werden kann, sollte ein Material verwendet werden, welches einen ausgeprägten plastischen Bereich aufweist. Dieses Verhalten wird angestrebt, da sich der Punkt, an welchem die jeweilige Stufe abgebrochen wird, dann besser ankündigt. Weiters sollte die Bruchdehnung nicht zu klein sein, da die einzelnen Stufen sonst in sehr kleinen Dehnungsbereichen ablaufen. Bei den Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abb. 5.9 ist gut zu erkennen, welche Materialien sich demnach für die Erarbeitung des mehrstufigen Versuchs eignen.

Material 998_4 verhält sich sehr spröde, da es eine geringe Bruchdehnung und kaum plastisches Verhalten aufweist. Material 998_3 weist ebenfalls eine vergleichsweise geringe Bruchdehnung auf. Die Materialien 998_2 und 998_1 besitzen ein Last-Verformungsverhalten, welches sich gut für mehrstufige Versuche eignet. Aufgrund dessen, dass die Aufbereitung des gebrochenen Materials 998_1 etwas aufwendig ist, wurde entschieden mit dem Material 998_2 die ersten mehrstufigen Triaxialversuche durchzuführen.



Abb. 5.10: Probekörper 998_2 nach dem einaxialen Druckversuch

6 Laborversuche - konventionelle und mehrstufige Triaxialversuche

In den folgenden Unterabschnitten des Kapitels 6 werden die einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung der mehrstufigen Prüfvorschrift erläutert. Die Nummerierung der Arbeitsschritte bezieht sich dabei immer auf die Versuchsübersicht, welche in Abb. 5.2 dargestellt ist.

6.1 Arbeitsschritt 1

6.1.1 Vorversuch mit dem Material 998_1

Der Triaxialversuch mit dem Material 998_1 wurde bereits vor den einaxialen Druckversuchen durchgeführt und diente dazu, sich mit der Triaxialversuchsanlage und der Prüfvorschrift erstmalig vertraut zu machen. Weiters konnte dadurch das Prozedere der Datenauslesung sowie die generelle Datenstruktur analysiert werden.

Der Versuch zeigte außerdem, dass sich die Probeform mit 67 mm Durchmesser nicht für den Triaxialversuch eignete, da die vorhandenen Filterplatten einen Durchmesser von 70 mm hatten. Dadurch konnte eine Umströmung des Probekörpers nicht verhindert werden, was negative Auswirkungen auf die Festigkeit zeigte. Daher wurden für die folgenden Versuche neue Probenformen mit 70 mm Durchmesser verwendet.

6.2 Arbeitsschritt 2

Bei diesem Arbeitsschritt wurde ein einaxialer Druckversuch mit dem Material 998_3 durchgeführt. Die Durchführung und die Ergebnisse sind bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

6.3 Arbeitsschritt 3

Bei diesem Arbeitsschritt wurde ein einaxialer Druckversuch mit dem Material 998_4 durchgeführt. Die Durchführung und die Ergebnisse sind bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

6.4 Arbeitsschritt 4

Die Beschreibung des einaxialen Druckversuches mit dem Material 998_2 sowie die Darstellung der Ergebnisse ist bereits in Kapitel 5.3.2 erfolgt.

6.4.1 Konventioneller Triaxialversuch mit dem Material 998_2

Nach der einaxialen Prüfung des Materials 998_2 wurde ein Triaxialversuch durchgeführt. Dazu wurde ein Probekörper in der Probenform mit 70 mm Durchmesser hergestellt. Der Wassergehalt sowie die Soll-Einbaudichte waren ident mit jenen des einaxialen Druckversuches. Der Einbau in die 70 mm Form erfolgte wieder mit dem kleinen Proctorhammer gemäß dem in Abb. 6.1 dargestellten Einbaurezept.

Projekt/Probe		SOLL-Dichte			
998	1+2	Proctordichte	ρ_{Pr} [kg/dm ³]	w opt [%]	ρ [kg/dm ³]
		100%	1.85	16.3%	2.15

Prüfkörper D 70 mm /H 140 mm

Verdichtung mit STANDARD PROCTOR Energie							Einbaumasse		
Durchmesser	Höhe	Schichten	Schichthöhe	Fläche	Volumen	SOLL-Feuchtdichte	rechn. Masse je Lage	gew. Masse je Lage	Mindestmasse +20%
d [cm]	h [cm]	n	h1 [cm]	A = n.m.g.h [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/dm ³]	m [g]	m [g]	mges [kg]
7	14	4	3.5	0.0038	0.0001	2.15	290	300	1.44
Schlagzahl n			Masse m[kg]	Fallhöhe hf [m]	Arbeit A = n.m.g.hf [Nm]	Arbeit / Volumen [MNm / m ³] (IST)	(SOLL)		
11			2.5	0.3	80.9	0.601	0.60		

**Einbau mit 4 Schichten je 300 g ,
Lagestärke ca. 3.5 cm (= 14 cm)
mit je 11 Schlägen Proctorhammer 2.5 kg**

Materialaufbereitung			
Vorgetr. Masse [g]	4000		
Restwassergehalt	0.3%	enth. Wasser [g]	12
Fehlender Wassergehalt	16.0%	erforderliche Wasserzugabe [g]	638
IST Trockenmasse [g]	3988	Feuchtmasse [g]	4638

Abb. 6.1: Einbaurezept für die Probe 998_2 zur Herstellung von Prüfkörpern mit 70 mm Durchmesser und ca. 140 mm Höhe

Nachdem der Probekörper, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, hergestellt und in die Prüfanlage eingebaut wurde, konnte der Triaxialversuch gestartet werden. Da es der erste Triaxialversuch mit dem Material 998_2 war, wurde der Versuch zunächst gestartet, ohne die genauen Parameter des Porenwasserdruckes und des Seitendruckes für die Sättigungs- und Konsolidationsphase zu kennen.

Nachdem die Initialbedingungen abgeschlossen waren, wurde der Sättigungsvorgang mit einem Porenwasserdruck von 70 kPa gestartet. Das „offset“ von Zelldruck zu Porendruck wurde zu

Beginn mit 30 kPa eingestellt, wonach der Zelldruck 100 kPa betrug. Das Verfahren zur Sättigung des Probekörpers wurde zu Beginn nicht mit dem „backpressure“ Verfahren durchgeführt, sondern durch eine einseitige Aufbringung des Porenwasserdruckes. An der Probenunterseite wurde demnach der Porenwasserdruck aufgebracht und an der Probenoberseite wurde die Drainage zur freien Entwässerung geöffnet. Die Sättigung kann als abgeschlossen angesehen werden, wenn Wasser durch die Probe durchgeströmt ist und an der oberen Drainage ausfließt.

Der Porenwasserdruck von 70 kPa wurde für 22 Stunden gehalten. Nachdem nach dieser Zeit noch kein Wasser in der oberen Drainageleitung zu sehen war, wurde der Porenwasserdruck auf 270 kPa erhöht. Das „offset“ wurde beibehalten, womit sich der Seitendruck auf 300 kPa erhöhte. Dieser Sättigungsdruck wurde für 89 Stunden beibehalten. Zu diesem Zeitpunkt wurde in der oberen Drainageleitung eine geringe Menge Wasser festgestellt. Gleichzeitig wurde jedoch auch ein Leck im Porenwasserdruckschlauch bemerkt. Der Sättigungsvorgang wurde demnach abgebrochen.

Anschließend wurde ein B-Test durchgeführt, welcher einen B-Wert von 0,91 lieferte. Da dieser Wert geringer als 0,95 war, galt der B-Test als nicht erfüllt und der Sättigungsvorgang hätte fortgesetzt werden müssen. Da der Versuch primär der Entwicklung der Prüfvorschrift diente, wurde der Versuch fortgesetzt und der Konsolidationsvorgang gestartet. Aufgrund des schwach durchlässigen Bodens und der dadurch erwarteten langen Dauer der Konsolidation, wurde der Seitendruck auf 500 kPa erhöht. Der Porenwasserdruckerzeuger wurde abgehängt und die Drainageleitungen für die Konsolidation geöffnet.

Der Konsolidationsvorgang dauerte von Stunde 112 bis Stunde 166, da zu diesem Zeitpunkt die normative Vorgabe von $0,1 \text{ cm}^3/\text{h}$ Volumenänderung unterschritten wurde. Anhand der Daten aus dem Konsolidationsvorgang konnte die maximal zulässige Abschergeschwindigkeit ermittelt werden. Dieser Vorgang wurde in Kapitel 4.7 bereits näher beschrieben. Nachdem die Abschergeschwindigkeit mit $0,004 \text{ \%/min}$ festgelegt wurde, konnte der Abschervorgang gestartet werden. Dieser erfolgte von Stunde 166 bis Stunde 257 und wurde bei einer Vertikalverformung von 21,5% abgebrochen. Der Probekörper nach dem Versuch ist in Abb. 6.3 dargestellt.

Die Daten des Abschervorganges sind in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abb. 6.2 dargestellt. Anhand dieser Daten wurden mittels Excel die ersten Versuche zur Definition der Abbruchbedingungen vorgenommen. Die violetten Punkte in Abb. 6.2 kennzeichnen die Abbruchpunkte für das Kriterium des Tangentenmoduls (Abbruchpunkt 2) sowie jene der maximalen Volumenkontraktion (Abbruchpunkt 1).

Mit den Daten aus diesem Triaxialversuch, welcher mit einem Seitendruck ($\sigma_2 = \sigma_3$) von 500 kPa durchgeführt wurde, und den Daten aus dem einaxialen Druckversuch konnte eine angenäherte Bruchgerade ermittelt werden. Anhand dieser Bruchgerade konnte abgeschätzt werden, welche maximalen Spannungen σ_1 in der jeweiligen Seitendruckstufe erreicht werden können. Mit diesem Wissen wurde anschließend ein erster mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_2 durchgeführt.

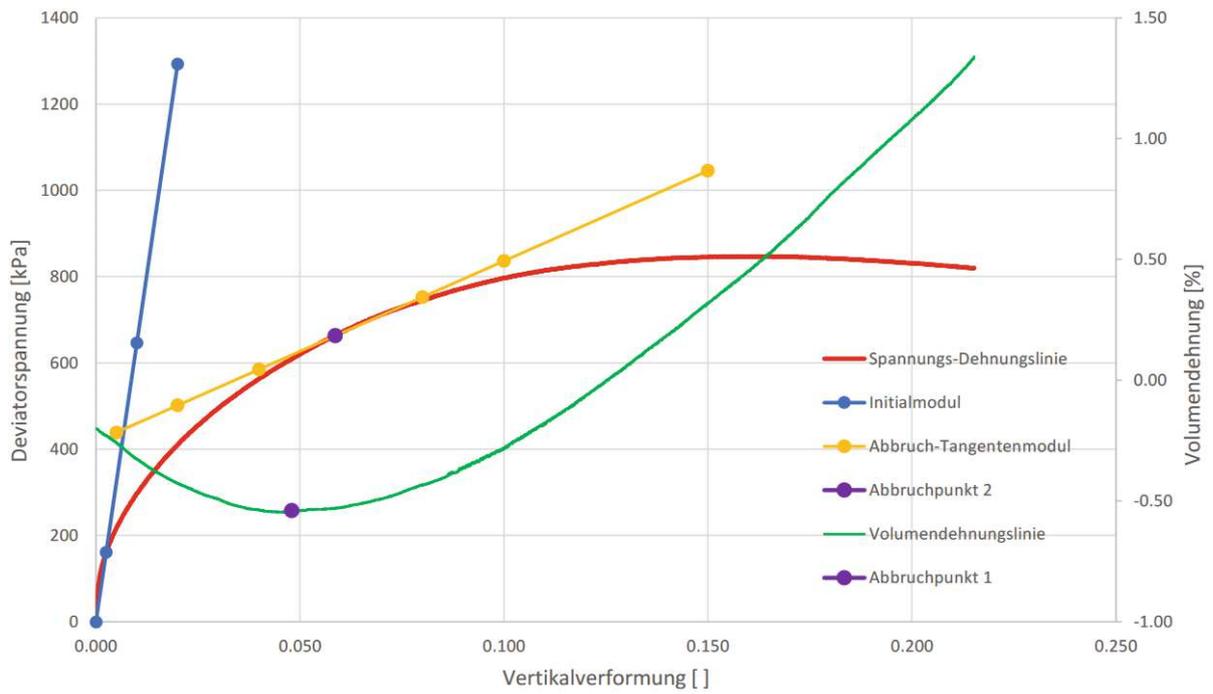


Abb. 6.2 Ermittlung der Abbruchpunkte anhand der Messdaten beim Versuch 998_2_Triax_1



Abb. 6.3 Probekörper nach dem konventionellen Triaxialversuch 998_2_Triax_1

6.4.2 Mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_2

Der Versuch mit dem Material 998_2 war der erste mehrstufige Triaxialversuch, welcher als 998_2_MSTriax_CID_1 bezeichnet wurde.

Gleich wie beim konventionellen Triaxialversuch mit dem Material 998_2 wurde ein Probekörper mit 70 mm Durchmesser, mit definiertem Wassergehalt und definierter Dichte laut Einbaurezept, welches in Abb. 6.1 dargestellt ist, hergestellt und in die Prüfanlage eingebaut.

Nachdem die Initialbedingungen abgeschlossen waren, wurde der Sättigungsvorgang gestartet. Dieser erfolgte wieder durch einseitige Aufbringung des Porendruckes an der Unterseite des Probekörpers. Während des Sättigungsvorganges wurde der Porendruck auf 70 kPa und der Zeldruck auf 100 kPa eingestellt.

Dieser Zustand wurde für 27,4 Stunden gehalten. Zu diesem Zeitpunkt kam es zu einem Computerabsturz, wodurch der Versuch unterbrochen wurde. Nach dem Neustart wurde eine separate Prüfvorschrift erstellt, mit welcher der Versuch dort fortgesetzt werden konnte, wo er unterbrochen wurde. Die Sättigung wurde fortgesetzt, für weitere 48 Stunden gehalten und anschließend der Konsolidationsvorgang gestartet. Für den Konsolidationsvorgang wurde der Porenwasserdruckerzeuger abgehängt und die Drainagen an beiden Seiten geöffnet. Der Zeldruck wurde konstant auf 100 kPa gehalten. Dieser Zustand wurde für 96 Stunden beibehalten.

Während der Sättigungs- und Konsolidationsvorgang im Gange war, wurde an der mehrstufigen Prüfvorschrift gearbeitet. Nach der Konsolidation wurde der Versuch unterbrochen, die neue Prüfvorschrift importiert und der Versuch beim ersten Abschervorgang fortgesetzt. Ziel war es, dass das Abbruchkriterium des Tangentenmoduls von der Prüfvorschrift selbsttätig durchgeführt wird. Nachdem der Initialmodul bei 0,25% Dehnung berechnet wurde, kam es allerdings zu einem Fehler und der Versuch wurde erneut abgebrochen. Dieser Trial-and-Error Prozess wurde noch vier Mal wiederholt. Anschließend konnte der Abschervorgang durchgeführt werden, jedoch funktionierte der selbsttätige Abbruch nicht zufriedenstellend, da noch keine Mittelwerte für den aktuellen Tangentenmodul programmiert und die Werte deshalb nicht aussagekräftig waren. Aus diesem Grund wurden die drei Scherstufen manuell abgebrochen und somit wurde ein erster manueller mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt. Der Probekörper nach dem Versuch ist in Abb. 6.6 dargestellt.

In Abb. 6.4 ist die Spannungs-Dehnungs-Kurve und in Abb. 6.5 sind die *Mohr'schen* Kreise des Versuches dargestellt. Vergleicht man diese Ergebnisse mit jenen des einaxialen Druckversuches und jenen des durchgeführten konventionellen Triaxialversuches (mit 500 kPa Seitendruck), so fällt auf, dass die maximale Spannung beim Mehrstufenversuch geringer ist. Dies könnte daran liegen, dass der Abschervorgang mehrere Male begonnen, bis etwa 0,25-1% Vertikaldehnung abgeschert und anschließend wieder abgebrochen wurde. Dadurch wurde der Probekörper vermutlich gestört und daher weist dieser geringere Bruchspannungen auf. Die Werte für den Reibungswinkel und die Kohäsion, welche aus diesem mehrstufigen Versuch ermittelt wurden, sind aufgrund mehrerer Störungen des Versuchskörpers nicht aussagekräftig.

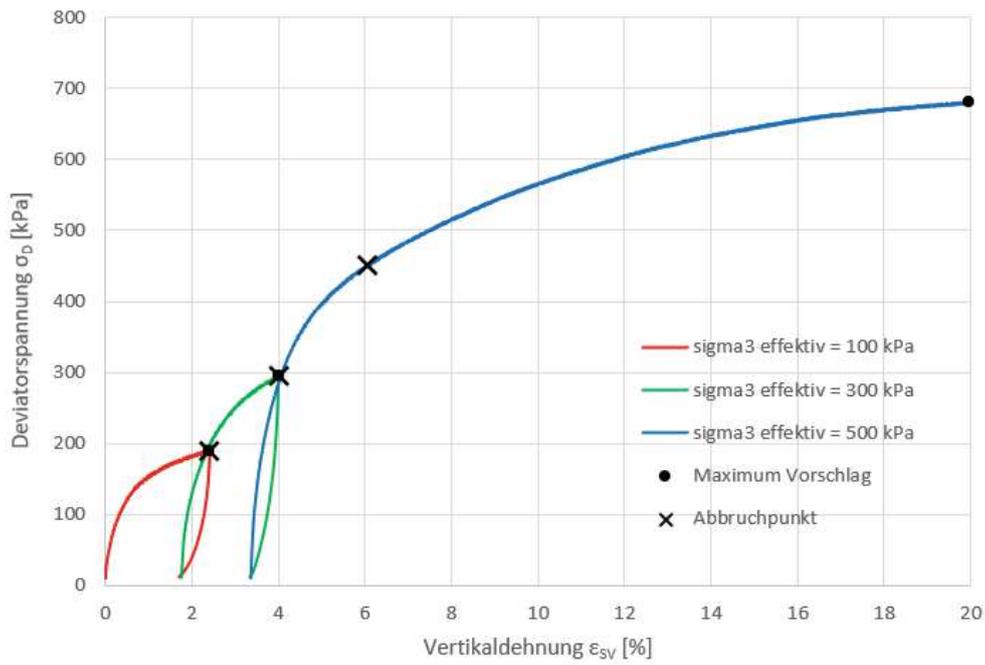


Abb. 6.4 Spannungs-Dehnungs-Kurven des Versuches 998_2_MSTriax_CID_1

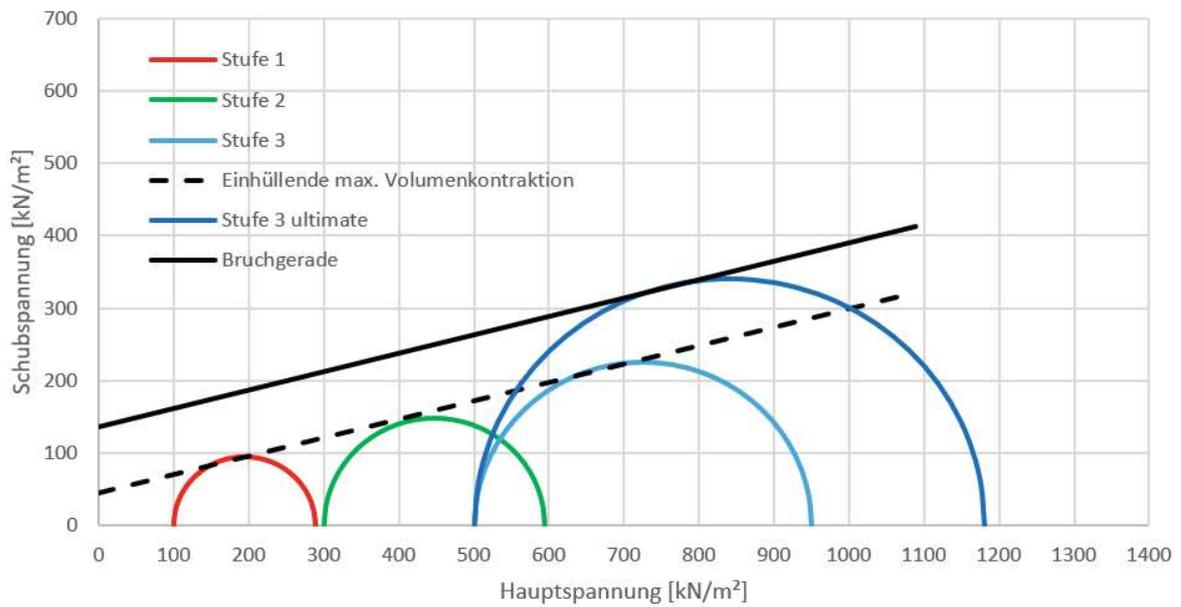


Abb. 6.5 Mohr'sche Spannungskreise des Versuches 998_2_MSTriax_CID_1



Abb. 6.6 Probekörper 998_2_MSTriax_1 nach dem Ausbau aus der Triaxialzelle

6.5 Arbeitsschritt 5

6.5.1 Konventionelle Triaxialversuche mit dem Material 998_5

Nachdem die Versuche mit dem Material 998_2 aufgrund der langen Sättigungs- und Konsolidationsdauer sehr zeitintensiv waren, wurde für die weitere Entwicklung der Prüfvorschrift ein anderes Material herangezogen. Das Material 998_5 ist ein grobkörniges, gut gestuftes Material, mit welchem in einem früheren Laborprojekt bereits konventionelle Triaxialversuche durchgeführt wurden. Aus diesem Grund eignete sich das Material besonders gut, da die Ergebnisse der konventionellen Triaxialversuche vorlagen und diese mit jenen des mehrstufigen Versuches verglichen werden konnten. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse wird in Kapitel 6.5.6 behandelt. Die Ergebnisse der früheren konventionellen Triaxialversuche, welche bereits 2022 vom Erdbaulabor der TU Wien durchgeführt wurden, werden nachfolgend in der Abb. 6.7 und der Abb. 6.8 dargestellt.

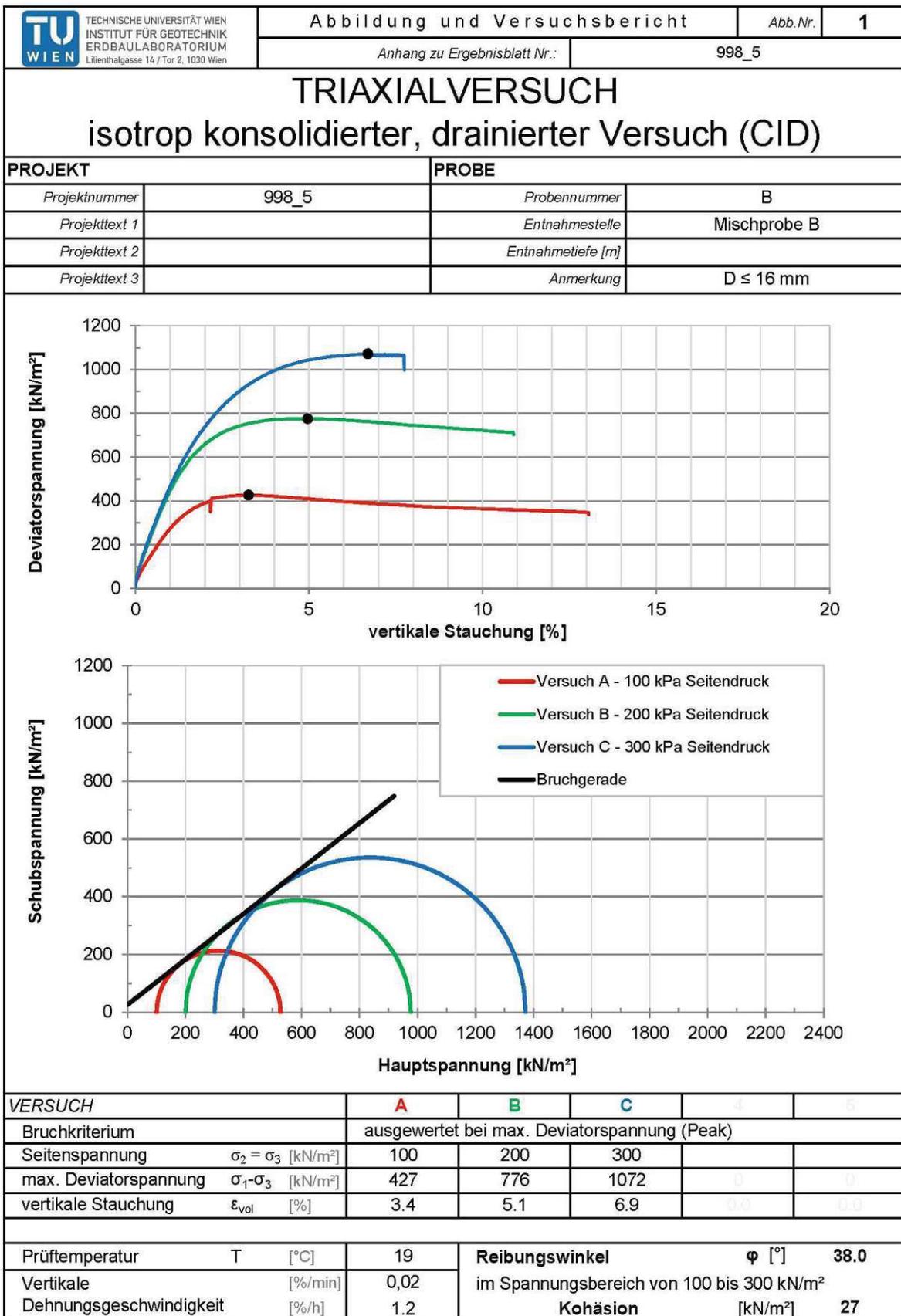


Abb. 6.7 Ergebnisprotokoll konventioneller Triaxialversuch mit Material 998_5, Seite 1 [Erdbaulabor TU Wien, 2022]

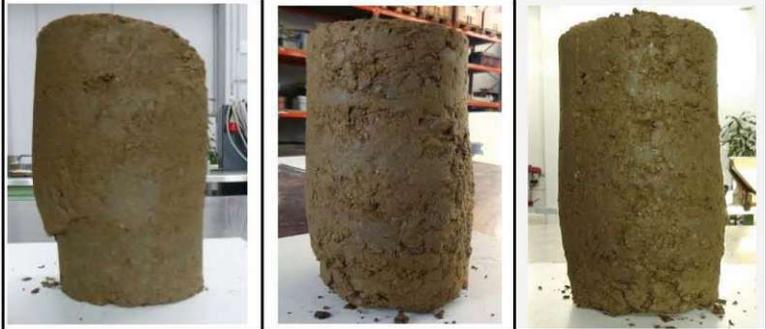
TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienthalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht			Abb.Nr.	
		Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:			998_5	
TRIAXIALVERSUCH isotrop konsolidierter, drainierter Versuch (CID)						
PROJEKT				PROBE		
Projektnummer	998_5			Probennummer	B	
Projekttext 1				Entnahmestelle	Mischprobe B	
Projekttext 2				Entnahmetiefe [m]		
Projekttext 3				Anmerkung	D ≤ 16 mm	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Proben vor Versuch</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Proben nach Versuch</p>  </div> </div>						
VERSUCH		A	B	C	d	e
ANFANGSZUSTAND						
Probenqualität	u/g/a *)	a	a	a	0	0
Probendurchmesser	d _o [mm]	101.4	101.8	101.1	0	0
Probenhöhe	h _o [mm]	198.05	196.4	185.2	0	0
Wasserg. Start	w _o [%]	10.1	10.1	10.1	-	-
Feuchtdichte	ρ [g/cm ³]	2.16	2.17	2.16	-	-
Trockendichte	ρ _d [g/cm ³]	1.96	1.97	1.97	-	-
Anfangsporenzahl	e _o [-]	0.38	0.37	0.37	-	-
Korndichte	ρ _s [g/cm ³]	2.76				
Anmerkungen Einbaudichte (Ziel)		98% Proctordichte				
NACH KONSOLIDIEREN / VOR ABSCHEREN						
Höhe	h [mm]	195.17	192.68	181.39	0.00	0.00
Trockendichte	ρ _d [g/cm ³]	1.99	2.01	2.01	-	-
NACH ABSCHEREN						
Wasserg. Ende	w _e [%]	12.7	12.5	11.7	-	-
*) u...ungestört g...gestört a...aufbereitet						

Abb. 6.8 Ergebnisprotokoll konventioneller Triaxialversuch mit Material 998_5, Seite 2 [Erdbaulabor TU Wien, 2022]

6.5.2 Erster mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_1)

Der erste mehrstufige Triaxialversuch mit dem Material 998_5 wurde als 998_5_MSTriax_CID_1 bezeichnet. Um Ergebnisse zu erzielen, die mit jenen der konventionellen Versuche vergleichbar sind, wurde ebenfalls ein Probekörper mit 100 mm Durchmesser und ca. 200 mm Höhe hergestellt. Dazu mussten, gemäß Einbaurezept in Abb. 6.9, vier Schichten mit jeweils 870 Gramm mit 32 Schlägen verdichtet werden.

Projekt/Probe						
998	5	SOLL-Dichte	Proctordichte	ρ_{Pr} [kg/dm ³]	w opt [%]	ρ [kg/dm ³]
			98%	2.02	10.5%	2.19

Prüfkörper D 100 mm /H 200 mm

Verdichtung mit STANDARD PROCTOR Energie								Einbaumasse	
Durchmesser	Höhe	Schichten	Schichthöhe	Fläche	Volumen	SOLL-Feuchtdichte	rechn. Masse je Lage	gew. Masse je Lage	Mindestmasse +20%
d [cm]	h [cm]	n	h1 [cm]	A = n.m.g.h [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/dm ³]	m [g]	m [g]	mges [kg]
10	20	4	5.0	0.0079	0.0004	2.19	859	870	4.2
Schlagzahl n			Masse m[kg]	Fallhöhe hf [m]	Arbeit A = n.m.g.hf [Nm]	Arbeit / Volumen [MNm / m ³] (IST)	(SOLL)		
32			2.5	0.3	235.4	0.600	0.60		

**Einbau mit 4 Schichten je 870 g ,
Lagestärke ca. 5 cm (= 20 cm)
mit je 32 Schlägen Proctorhammer 2,5 kg**

Materialaufbereitung

Vorgetr. Masse [g]	4000		
Restwassergehalt	0.3%	enth. Wasser [g]	12
Fehlender Wassergehalt	10.2%	erforderliche Wasserzugabe [g]	407
IST Trockenmasse [g]	3988	Feuchtmasse [g]	4407

Abb. 6.9 Einbaurezept für die Probe 998_5 zur Herstellung von Prüfkörpern mit 100 mm Durchmesser und ca. 200 mm Höhe

In Abb. 6.10 ist der hergestellte Probekörper vor dem Versuch dargestellt. Dieser hatte einen Durchmesser von 10,08 cm, eine Höhe von 19,86 cm und eine Feuchtdichte von 2,17 g/cm³. Der Wassergehalt vor dem Versuch betrug 11,2%.



Abb. 6.10 Probekörper 998_5_MSTriax_CID_1 vor dem Versuch

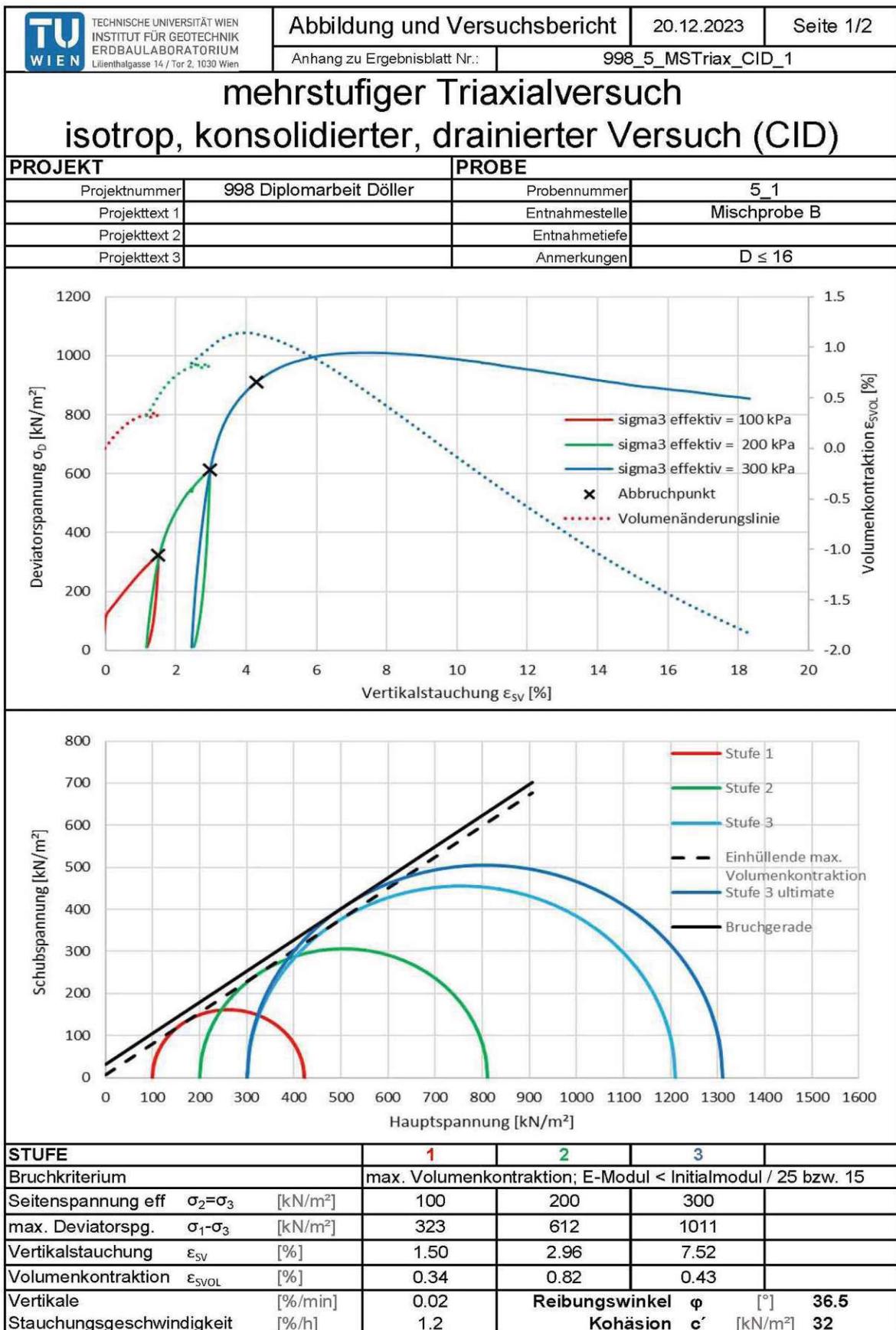
Der kompakte Probekörper konnte ohne Probleme in die Prüfmaschine eingebaut und der Versuch gestartet werden. Die Sättigung wurde durch Aufbringen eines einseitigen Porenwasserdruckes über eine Zeit von 5,5 Stunden durchgeführt. Die Sättigung erfolgte mit einem Porendruck von 70 kPa bei einem Zelldruck von 100 kPa. Anschließend wurden die Drainagen vollständig geöffnet und der Probekörper für etwa 11,5 Stunden bei einem Zelldruck von 100 kPa konsolidiert.

Die Schergeschwindigkeit wurde mit 0,02 %/min festgelegt, da diese auch für die konventionellen Versuche verwendet wurde. Der Abschervorgang wurde gestartet, jedoch bei 0,25% Vertikaldehnung wieder abgebrochen, da ein Fehler in der Prüfvorschrift aufgetreten ist. Dieser Fehler wurde behoben und anschließend wurde der Versuch fortgesetzt. Der Schervorgang der ersten Stufe wurde anhand der dargestellten Diagramme mitverfolgt und bei Erreichen der maximalen Volumenkontraktion manuell abgebrochen.

Anschließend wurde die zweite Konsolidationsphase mit einem Zelldruck von 200 kPa eingeleitet. Nach 4,5 Stunden wurde der zweite Abschervorgang gestartet und abermals manuell bei der maximalen Volumenkontraktion abgebrochen. Der dritte Konsolidationsvorgang erfolgte mit 300 kPa Zelldruck und wurde nach 1,5 Stunden abgebrochen. Der dritte Abschervorgang erfolgte bis zu einer Vertikalverformung von 18,3%.

In Abb. 6.11 und Abb. 6.12 sind die Ergebnisse des ersten mehrstufigen Versuches mit dem Material 998_5 zu sehen. In der Arbeitslinie, welche in Abb. 6.11 dargestellt ist, ist gut zu erkennen, dass der Abbruch bei der maximalen Volumenkontraktion deutlich vor der maximalen Deviatorspannung und dadurch deutlich vor dem Versagen des Probekörpers liegt. Diese Methode liegt bei diesem Material somit auf der sicheren Seite. Durch Anpassung der Schergeraden an den *Mohr'schen* Kreis der letzten Stufe, welche bis zum Versagen durchgeführt wurde, konnte die Bruchgerade ermittelt werden. Diese zeigt, wie in Kapitel 6.5.6 dargestellt, eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der konventionellen Triaxialversuche.

In der Volumenänderungskurve ist weiters gut zu erkennen, dass der Probekörper anfangs eine Kontraktion erfährt und nach etwa 4% Vertikalverformung eine Auflockerung des Probekörpers beginnt, welche in weiterer Folge über den Nullpunkt hinaus und somit in eine Dilatation übergeht. Dieses Verhalten ist auf eine Gefügezerstörung des grobkörnigen Materials zurückzuführen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 6.11 Ergebnisprotokoll von Versuch 998_5_MSTriax_1, Seite 1

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienhalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		20.12.2023	Seite 2/2
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		998_5_MSTriax_CID_1			
mehrstufiger Triaxialversuch isotrop, konsolidierter, drainierter Versuch (CID)					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	998 Diplomarbeit Döller		Probennummer	5_1	
Projekttext 1			Entnahmestelle	Mischprobe B	
Projekttext 2			Entnahmetiefe		
Projekttext 3			Anmerkungen	D ≤ 16	
Probe vor Versuch			Probe nach Versuch		
					
STUFE					
		1	2	3	
ANFANGSZUSTAND					
Probenqualität	u/g/a ^{*)}	a			
Probendurchmesser	d ₀ [mm]	100.8			
Probenhöhe	h ₀ [mm]	198.6			
Wasserg. Start	w ₀ [%]	11.2			
Feuchtdichte Start	ρ ₀ [g/cm ³]	2.17			
Trockendichte Start	ρ _{d0} [g/cm ³]	1.95			
KONSOLIDATION					
Drainagebedingungen	d/ud ^{*)}	d	d	d	
effektive Spannung Kons. Ende	[kN/m ²]	100	200	300	
aufgebrachter Endgegendruck	[kN/m ²]	-	-	-	
Vertikalstauchung Kons. Ende	[%]	0.76	1.16	2.45	
Volumenkontraktion Kons. Ende	[%]				
Geschw. Vol.kontraktion Ende	[%/h]	<0.1%/h	<0.1%/h	<0.1%/h	
Endgültiger B-Wert	[%]	-			
weitere Anmerkungen:					

Abb. 6.12 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_1, Seite 2

6.5.3 Zweiter mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTri_2)

Für den Versuch 998_5_MSTriax_2 wurde wieder ein Probekörper nach dem Einbaurezept gemäß Abb. 6.9 hergestellt.

Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der konventionellen Versuche bestmöglich herzustellen, wurde die Sättigungsdauer und die Konsolidationsdauer bei diesem Versuch nahezu identisch wie bei den konventionellen Versuchen gewählt. Die Sättigung wurde demnach für 1,2 Stunden und die Konsolidation für etwa drei Stunden durchgeführt. Die Sättigung erfolgte abermals durch einseitiges Aufbringen eines Porenwasserdruckes mit 70 kPa (an der Probekörperunterseite) bei einem Zelldruck von 100 kPa. Die weiteren Versuchsparameter sind in der Auswertung in Abb. 6.13 sowie Abb. 6.14 zu sehen.

Die Prüfvorschrift wurde nach dem ersten mehrstufigen Versuch mit Material 998_5 weiter verbessert. Bei diesem Versuch konnte somit ein erster automatisierter mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt werden. Die Prüfvorschrift hat während des Abschervorgangs laufend das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion überprüft und bei Erreichen dieses Kriteriums wurde der jeweilige Abschervorgang automatisch unterbrochen und die nächste Stufe eingeleitet.

Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

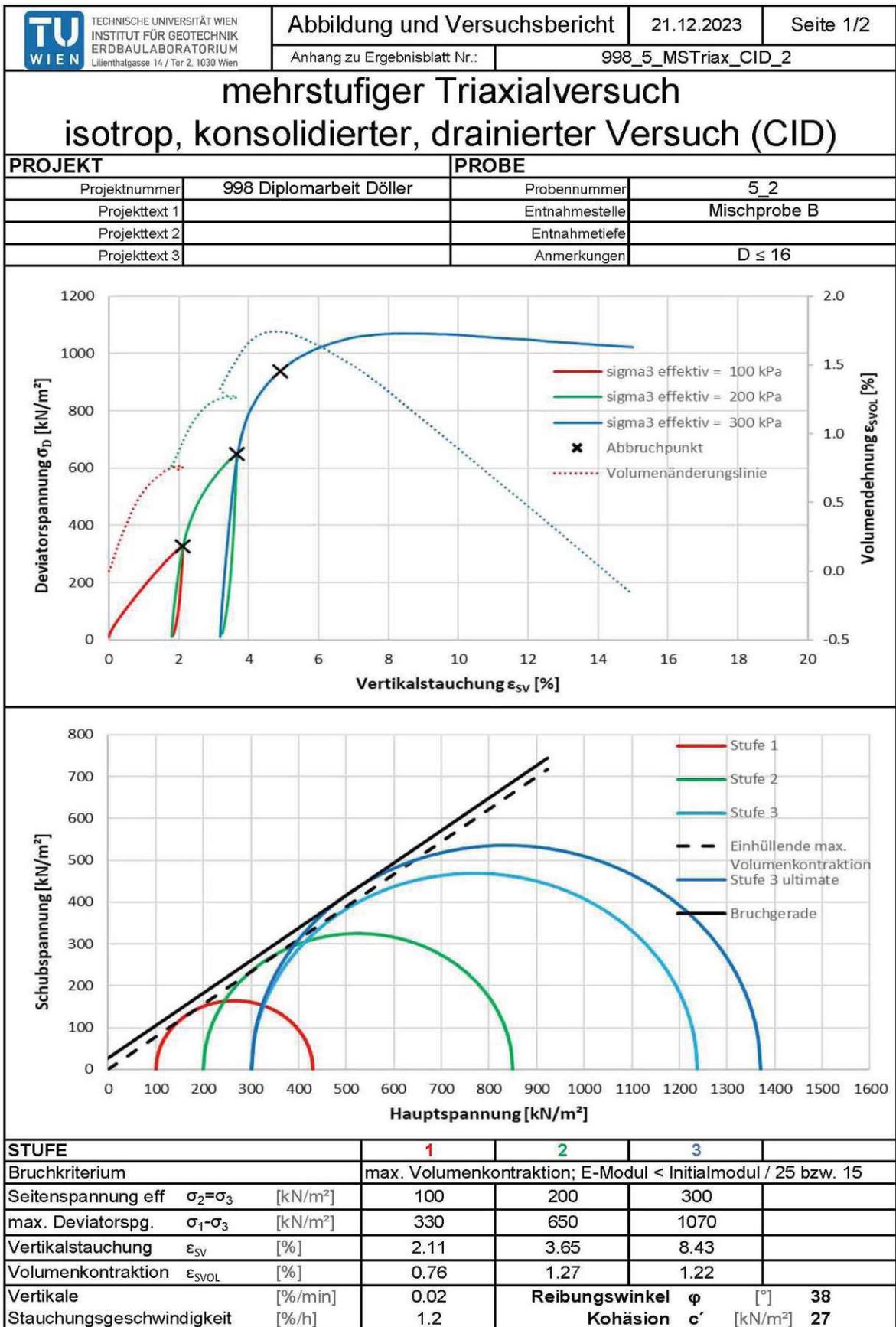


Abb. 6.13 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_2, Seite 1

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienhalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		21.12.2023	Seite 2/2
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		998_5_MSTriax_CID_2			
mehrstufiger Triaxialversuch isotrop, konsolidierter, drainierter Versuch (CID)					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	998 Diplomarbeit Döllner		Probennummer	5_2	
Projekttext 1			Entnahmestelle	Mischprobe B	
Projekttext 2			Entnahmetiefe		
Projekttext 3			Anmerkungen	D ≤ 16	
Probe vor Versuch			Probe nach Versuch		
					
STUFE					
1 2 3					
ANFANGSZUSTAND					
Probenqualität	u/g/a ^{*)}	a			
Probendurchmesser	d ₀ [mm]	101.4			
Probenhöhe	h ₀ [mm]	194.4			
Wasserg. Start	w ₀ [%]	10.3			
Feuchtdichte Start	ρ ₀ [g/cm ³]	2.21			
Trockendichte Start	ρ _{d0} [g/cm ³]	2.00			
KONSOLIDATION					
Drainagebedingungen	d/ud ^{*)}	d	d	d	
effektive Spannung Kons. Ende	[kN/m ²]	100	200	300	
aufgebrachter Endgegenstand	[kN/m ²]	-	-	-	
Vertikalstauchung Kons. Ende	[%]	0.43	1.79	3.18	
Volumenkontraktion Kons. Ende	[%]				
Geschw. Vol.kontraktion Ende	[%/h]	<0.1%/h	<0.1%/h	<0.1%/h	
Endgültiger B-Wert	[%]		-		
weitere Anmerkungen:					

Abb. 6.14 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_2, Seite 2

6.5.4 Dritter mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_3)

Für den dritten Versuch mit Material 998_5 wurde wieder ein Probekörper gemäß Einbaurezept in Abb. 6.9 hergestellt.

Nachdem bei dem Versuch 998_5_MSTriax_2 das Abbruchkriterium der maximalen Kontraktion erfolgreich angewendet wurde, wurde weiter an der Prüfvorschrift für das Modul-Abbruchkriterium gearbeitet. Bei diesem Versuch wurde demnach wieder eine überarbeitete Prüfvorschrift getestet.

Nach dem Einbau des Probekörpers wurde der Entlüftungsvorgang des gesamten Systems durchgeführt. Bei der Entlüftung des unteren Porenwasserdrucksystems kam es jedoch zu dem Problem, dass die Latexhülle durch den geringen aufgebrachtten Porenwasserdruck ohne aufgebrachtten Zelldruck aufgebläht und so der Probekörper umspült wurde. Dies führte zu einer Auswaschung von Feinanteilen und der Probekörper wurde somit gestört. Der Versuch hätte somit abgebrochen werden müssen, da die Ergebnisse nicht die tatsächliche Festigkeit des Probekörpers ergeben hätten. Aufgrund dessen, dass der Versuch der Erarbeitung der Prüfvorschrift diente, wurde dieser jedoch trotzdem weiter durchgeführt. Der ausgewaschene Probekörper ist im Ergebnisblatt in Abb. 6.16 dargestellt.

Die Dauer und die Parameter der Sättigung und der Konsolidation wurden wieder gleich wie bei den konventionellen Versuchen gewählt.

Beim Abschervorgang konnte das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion wieder mitverfolgt werden. Beim Modul-Kriterium gab es jedoch nach wie vor Probleme. Die Abschervorgänge der Stufe 2 und der Stufe 3 wurden demnach wieder bei Erreichen der maximalen Volumenkontraktion abgebrochen.

In den Ergebnissen, welche in Abb. 6.15 und Abb. 6.16 dargestellt sind, ist zu sehen, dass durch die Umspülung des Probekörpers die maximalen Spannungen im Vergleich zu den beiden vorherigen Versuchen etwas geringer ausfallen. Die Werte für den Reibungswinkel und die Kohäsion sind jedoch sehr ähnlich.

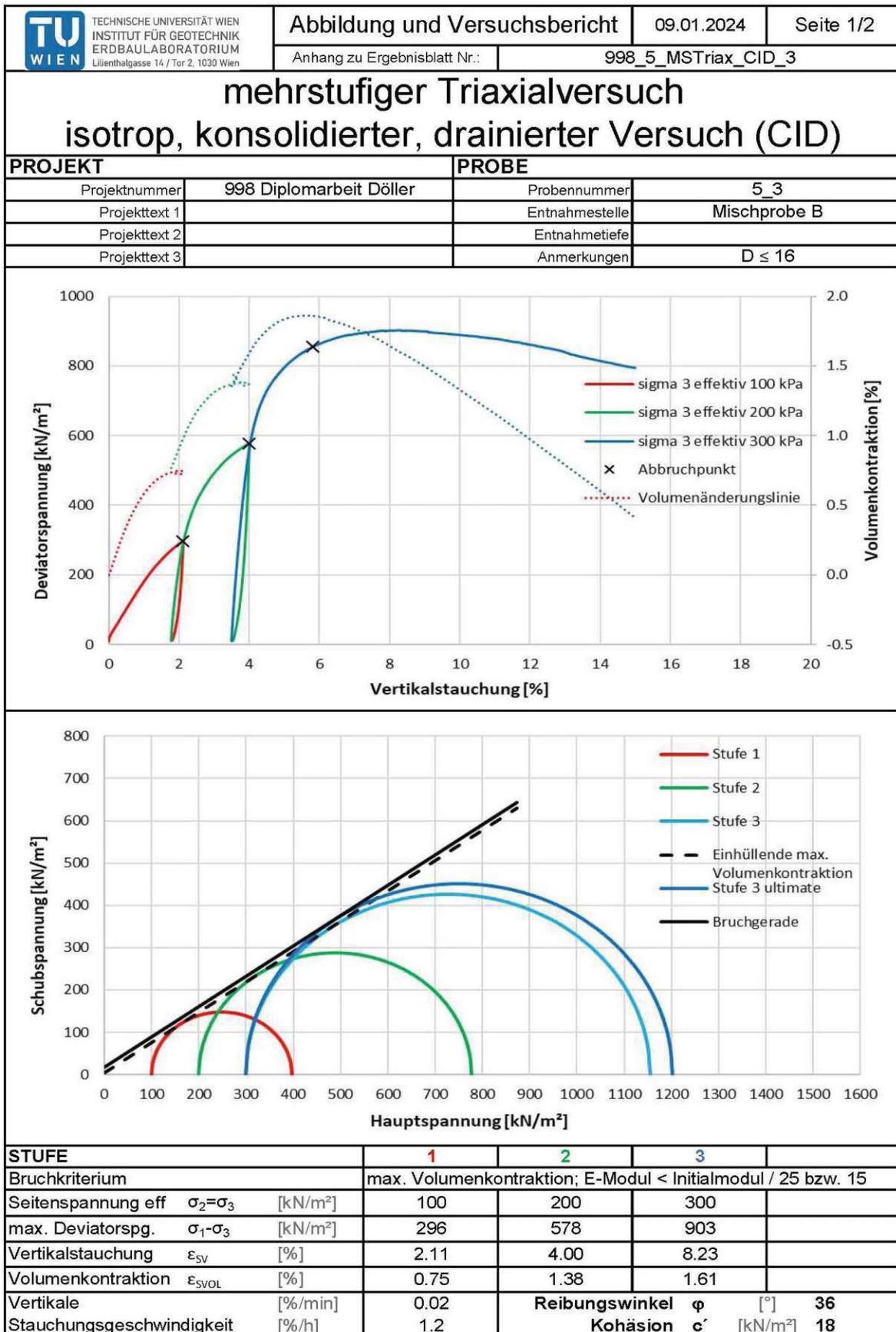


Abb. 6.15 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_3, Seite 1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

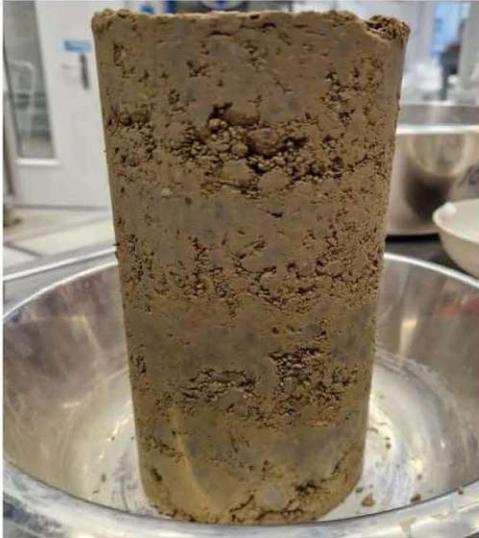
TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienhalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		09.01.2024	Seite 2/2
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		998_5_MSTriax_CID_3			
mehrstufiger Triaxialversuch isotrop, konsolidierter, drainierter Versuch (CID)					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	998 Diplomarbeit Döller		Probennummer	5_3	
Projekttext 1			Entnahmestelle	Mischprobe B	
Projekttext 2			Entnahmetiefe		
Projekttext 3			Anmerkungen	D ≤ 16	
Probe vor Versuch			Probe nach Versuch		
					
			Probekörper bei der Entlüftung des Porenwasserdruckes ümspült worden		
STUFE		1	2	3	
ANFANGSZUSTAND					
Probenqualität	u/g/a ^{*)}	a			
Probendurchmesser	d ₀ [mm]	100.8			
Probenhöhe	h ₀ [mm]	198.3			
Wasserg. Start	w ₀ [%]	11			
Feuchtdichte Start	ρ ₀ [g/cm ³]	2.19			
Trockendichte Start	ρ _{d0} [g/cm ³]	1.97			
KONSOLIDATION					
Drainagebedingungen	d/ud ^{*)}	d	d	d	
effektive Spannung Kons. Ende	[kN/m ²]	100	200	300	
aufgebrachter Endgegenndruck	[kN/m ²]	-	-	-	
Vertikalstauchung Kons. Ende	[%]	0.91	1.77	3.50	
Volumenkontraktion Kons. Ende	[%]				
Geschw. Vol.kontraktion Ende	[%/h]	<0.1%/h	<0.1%/h	<0.1%/h	
Endgültiger B-Wert	[%]	-			
weitere Anmerkungen:					

Abb. 6.16 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_3, Seite 2

6.5.5 Vierter mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_5 (MSTriax_4)

Für den vierten Versuch mit Material 998_5 wurde wieder ein Probekörper gemäß dem Einbaurezept in Abb. 6.9 hergestellt.

Nachdem die Probe eingebaut wurde und die Initialbedingungen abgeschlossen waren, wurde mit dem Sättigungsvorgang begonnen. Dieser erfolgte bei diesem Versuch erstmals nach dem „backpressure“ Prinzip. Dabei wird an beiden Probenenden ein Porenwasserdruck aufgebracht, wodurch die Probe von beiden Seiten aus gesättigt und die vorhandene Luft im Probekörper durch den angelegten Druck im Wasser gelöst wird. Die Sättigung erfolgte mit einem Porenwasserdruck von 300 kPa bei einem Zelldruck von 310 kPa. Dieser Zustand wurde für 2,5 Stunden gehalten.

Anschließend wurde die erste Konsolidationsphase gestartet. Dafür wurde der Zelldruck um 100 kPa erhöht, wobei der Porenwasserdruck konstant gehalten wurde. Nachdem die Konsolidation abgeschlossen war, wurde der Abschervorgang gestartet. Dabei kam es zu einem kleinen Fehler in der Definition des effektiven Zelldruckes. Dies führte dazu, dass der effektive Zelldruck nicht wie bei den anderen Versuchen bei 100/200/300 kPa lag, sondern bei 120/220/320 kPa. Der Porenwasserdruck wurde dabei für alle weiteren Phasen des Versuches konstant bei 300 kPa gehalten, wobei die Drainage geöffnet war (drainierter Versuch).

In den Ergebnissen, welche in Abb. 6.17 und Abb. 6.18 dargestellt sind, ist zu erkennen, dass der Punkt der maximalen Volumenkontraktion erst bei höheren Stauchungen als bei den zuvor durchgeführten Versuchen auftrat. Dadurch erfolgte der Abbruch durch das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion bei den jeweiligen Stufen erst bei Spannungen, welche nah an den maximal möglichen Spannungswerten liegen. Aus diesem Grund gibt es bei der dritten Stufe im Diagramm der *Mohr'schen* Spannungskreise in Abb. 6.17 auch keinen eigenen *Mohr'schen* Kreis für die Maximalspannung (Stufe 3 ultimate), da sich dieser mit dem der Stufe 3 deckt.

Weiters ist zu erkennen, dass bei einer Stauchung von etwa 13% ein unerwarteter Anstieg in der Deviatorspannung vorliegt. Dieser Anstieg, bei dieser fortgeschrittenen Stauchung ist bodenmechanisch nicht zu erklären, weshalb für die Auswertung die maximale Spannung vor diesem Anstieg herangezogen wurde.

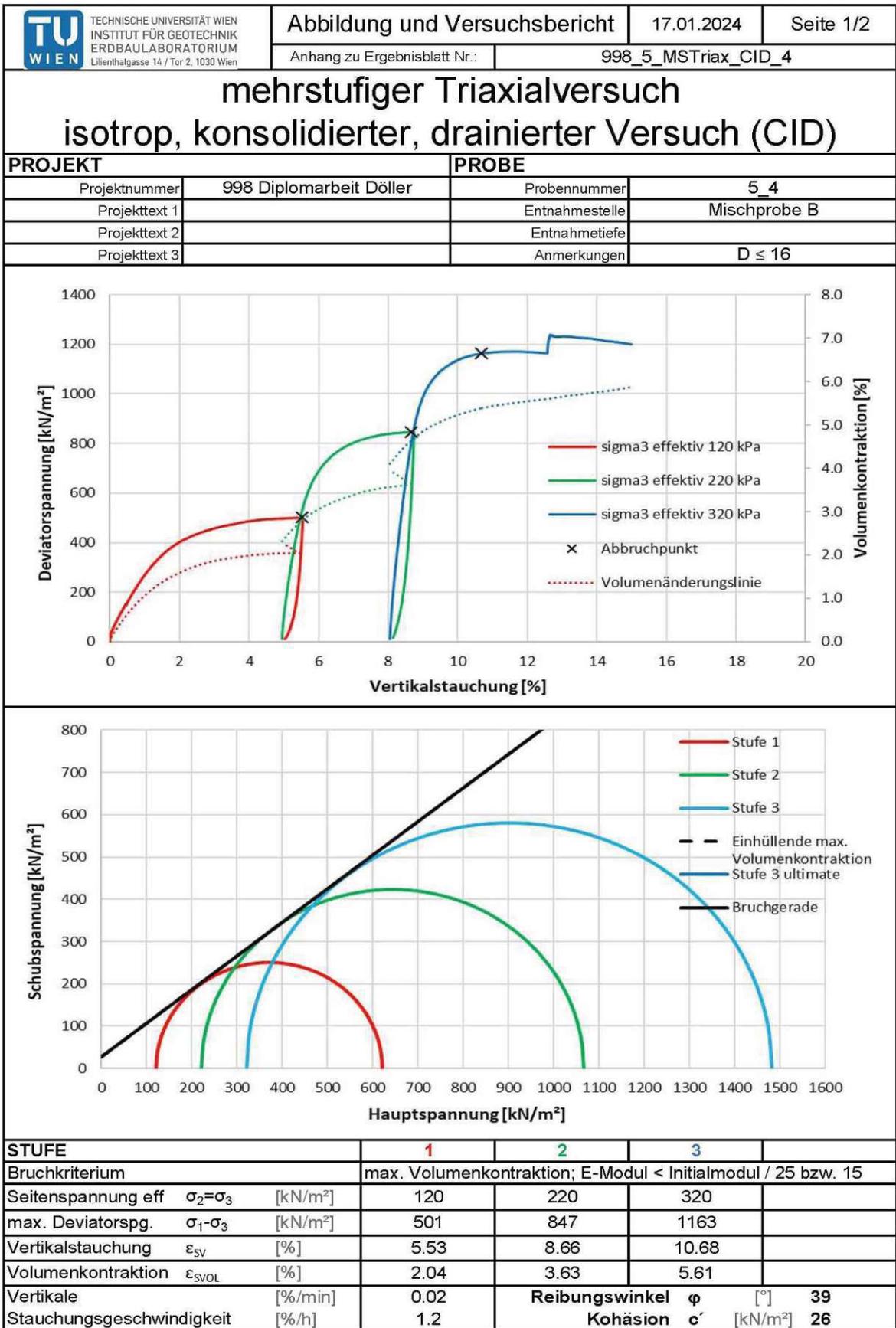


Abb. 6.17 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_4, Seite 1

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienthalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		17.01.2024	Seite 2/2
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		998_5_MSTriax_CID_4			
mehrstufiger Triaxialversuch isotrop, konsolidierter, drainierter Versuch (CID)					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	998 Diplomarbeit Döller		Probennummer	5_4	
Projekttext 1			Entnahmestelle	Mischprobe B	
Projekttext 2			Entnahmetiefe		
Projekttext 3			Anmerkungen	D ≤ 16	
Probe vor Versuch			Probe nach Versuch		
					
STUFE					
1 2 3					
ANFANGSZUSTAND					
Probenqualität	u/g/a ^{*)}			a	
Probendurchmesser	d ₀	[mm]			100.8
Probenhöhe	h ₀	[mm]			201.1
Wasserg. Start	w ₀	[%]			10.7
Feuchtdichte Start	ρ ₀	[g/cm ³]			2.16
Trockendichte Start	ρ _{d0}	[g/cm ³]			1.95
KONSOLIDATION					
Drainagebedingungen	d/ud ^{*)}	d	d	d	
effektive Spannung Kons. Ende	[kN/m ²]	110	220	320	
aufgebrachter Endgegendruck	[kN/m ²]	300	300	300	
Vertikalstauchung Kons. Ende	[%]	1.79	4.94	8.04	
Volumenkontraktion Kons. Ende	[%]				
Geschw. Vol.kontraktion Ende	[%/h]	<0.1%/h	<0.1%/h	<0.1%/h	
Endgültiger B-Wert	[%]	-			
weitere Anmerkungen:					

Abb. 6.18 Ergebnisprotokoll Versuch 998_5_MSTriax_4, Seite 2

6.5.6 Vergleich der konventionellen- und der mehrstufigen Triaxialversuche mit dem Material 998_5

In Abb. 6.19 sind die Ergebnisse der konventionellen Triaxialversuche und der Mehrstufenversuche gegenübergestellt. Bei Betrachtung der Scherparameter Reibungswinkel und Kohäsion kann eine gute Übereinstimmung der Werte festgestellt werden, obwohl bei der Versuchsdurchführung immer wieder Probleme auftraten. Die maximalen Deviatorspannungen sowie auch die zugehörigen Vertikalverformungen bei der ersten (100 kPa) und zweiten (200 kPa) Stufe der Mehrstufenversuche sind aufgrund der Unterbrechung vor dem Erreichen der Bruchspannung etwas geringer als beim konventionellen Versuch. Bei der dritten Stufe (300 kPa) passen die Deviatorspannungen und Vertikalverformungen jedoch gut zusammen.

Anhand dieses Vergleiches kann schlussgefolgert werden, dass für diesen eher grobkörnigeren Boden ($c_l' \text{ si sa}^* \text{ Gr}$) die Anwendung des mehrstufigen Triaxialversuches mit der Abbruchbedingung der maximalen Volumenkontraktion erfolgreich angewendet werden kann.

	Reibungswinkel	Kohäsion	$\sigma_{3,\text{eff}} = 100 \text{ kPa}$		$\sigma_{3,\text{eff}} = 200 \text{ kPa}$		$\sigma_{3,\text{eff}} = 300 \text{ kPa}$	
	φ	c'	max σ_D	ϵ_{SV}	max σ_D	ϵ_{SV}	max σ_D	ϵ_{SV}
konventioneller Versuch	38.0	27.0	427.0	3.4	776.0	5.1	1072.0	6.9
Mehrstufenversuch 1	36.5	32.0	323.0	1.5	612.0	3.0	1011.0	7.5
Mehrstufenversuch 2	38.0	27.0	330.0	2.1	650.0	3.7	1070.0	8.4
Mehrstufenversuch 3	36.0	18.0	296.0	2.1	578.0	4.0	903.0	8.2
Mehrstufenversuch 4*	39.0	26.0	501.0	5.5	847.0	8.7	1163.0	10.7

* $\sigma_{3,\text{eff}} = 120/220/320$ & Sättigung mit backpressure

Abb. 6.19 Vergleich der Ergebnisse der mehrstufigen und konventionellen Triaxialversuche mit dem Material 998_5

6.6 Arbeitsschritt 6

6.6.1 Mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_6

Um die erstellte Prüfvorschrift für den mehrstufigen Triaxialversuch nicht nur für die Abbruchbedingung der maximalen Volumenkontraktion erfolgreich anzuwenden, sondern auch die Abbruchbedingung des Modulkriteriums zu testen, mussten weitere mehrstufige Triaxialversuche mit anderen Böden durchgeführt werden. Damit die Unterbrechung des Abschervorganges nicht durch das Kriterium der maximalen Volumenkontraktion, sondern durch das Modulkriterium erfolgt, sollte erfahrungsgemäß ein bindiges Material eingesetzt werden. Daher wurde zunächst das Material 998_6 herangezogen. Dieses Material setzte sich zu 40% aus dem feinkörnigen Material 998_2 und zu 60% aus einem grobkörnigen Material zusammen. Damit wurde versucht eine geeignete bindige Probe herzustellen, welche noch eine vertretbare Sättigungs- und Konsolidationsdauer aufweist. Der Probekörper aus dem Material 998_6 wurde gemäß dem Einbaurezept aus Abb. 6.20 hergestellt.

Projekt/Probe		SOLL-Dichte			
998	6	Proctordichte	ρ_{Pr} [kg/dm ³]	w opt [%]	ρ [kg/dm ³]
		103%	1.847	12.5%	2.21

Prüfkörper D 100 mm /H 200 mm

Verdichtung mit STANDARD PROCTOR Energie								Einbaumasse	
Durchmesser	Höhe	Schichten	Schichthöhe	Fläche	Volumen	SOLL-Feuchtdichte	rechn. Masse je Lage	gew. Masse je Lage	Mindestmasse +20%
d [cm]	h [cm]	n	h1 [cm]	A = n.m.g.h [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/dm ³]	m [g]	m [g]	mges [kg]
10	20	8	2.5	0.0079	0.0002	2.21	434	450	4.3
Schlagzahl n			Masse m[kg]	Fallhöhe hf [m]	Arbeit A = n.m.g.hf [Nm]	Arbeit / Volumen [MNm / m ³] (IST)		(SOLL)	
35			2.5	0.3	257.5	1.312		0.60	

**Einbau mit 8 Schichten je 450 g ,
Lagestärke ca. 2.5 cm (= 20 cm)
mit je 35 Schlägen Proctorhammer 2.5 kg**

Materialaufbereitung			
Vorgetr. Masse [g]	4000		
Restwassergehalt	0.3%	enth. Wasser [g]	12
Fehlender Wassergehalt	12.2%	erforderliche Wasserzugabe [g]	487
IST Trockenmasse [g]	3988	Feuchtmasse [g]	4487

Abb. 6.20 Einbaurezept für die Probe 998_6 zur Herstellung von Prüfkörpern mit 100 mm Durchmesser und ca. 200 mm Höhe

Bereits bei der Herstellung des Probekörpers zeigte sich, dass dieses Material aufgrund der geringen Konsistenz schwer zu handhaben war. Es wurde jedoch trotzdem ein mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt.

Nachdem das Material eingebaut war und die Initialbedingungen abgeschlossen waren, wurde der Sättigungsvorgang mit dem „backpressure“ Verfahren begonnen. Dabei sollte die Probe durch stufenweise Steigerung mit einem Porenwasserdruck von schlussendlich 700 kPa gesättigt werden. Bei Erreichen dieses Druckes kam es jedoch zu einem Schlauchbruch. Somit wurde der Versuch von neuem gestartet. Nach dem Neustart wurde der Porenwasserdruck zur Sättigung auf 300 kPa eingestellt. Die Sättigungsdauer betrug 18 Stunden.

Die Konsolidation der ersten Stufe erfolgte bei einem Zelldruck von 400 kPa und einem Porenwasserdruck von 300 kPa für 31 Stunden. Beim Abschervorgang der ersten Stufe konnte das Modul-Abbruchkriterium getestet werden. Die erste Stufe wurde von der Prüfvorschrift automatisch bei der Unterschreitung eines bestimmten Moduls abgebrochen. Jedoch stellte sich heraus, dass die Berechnung des aktuellen Tangentenmoduls noch feingliedriger durchgeführt werden musste.

Anschließend erfolgte der zweite Konsolidationsvorgang. Beim Abschervorgang der zweiten Stufe erfolgte die Unterbrechung wieder automatisch durch die Prüfvorschrift. Nachdem der Konsolidationsvorgang der dritten Stufe abgeschlossen war, kam es beim Abschervorgang der dritten Stufe abermals zu einer Undichtigkeit der Versuchsanlage, aufgrund welcher der Versuch abgebrochen wurde.

Die Ergebnisse sind in der Abb. 6.21 und Abb. 6.22 dargestellt. Aufgrund mehrerer Störungen des Probekörpers durch den Verlauf des Versuches spiegeln die ermittelten Scherparameter sehr wahrscheinlich nicht die Wirklichkeit wider.

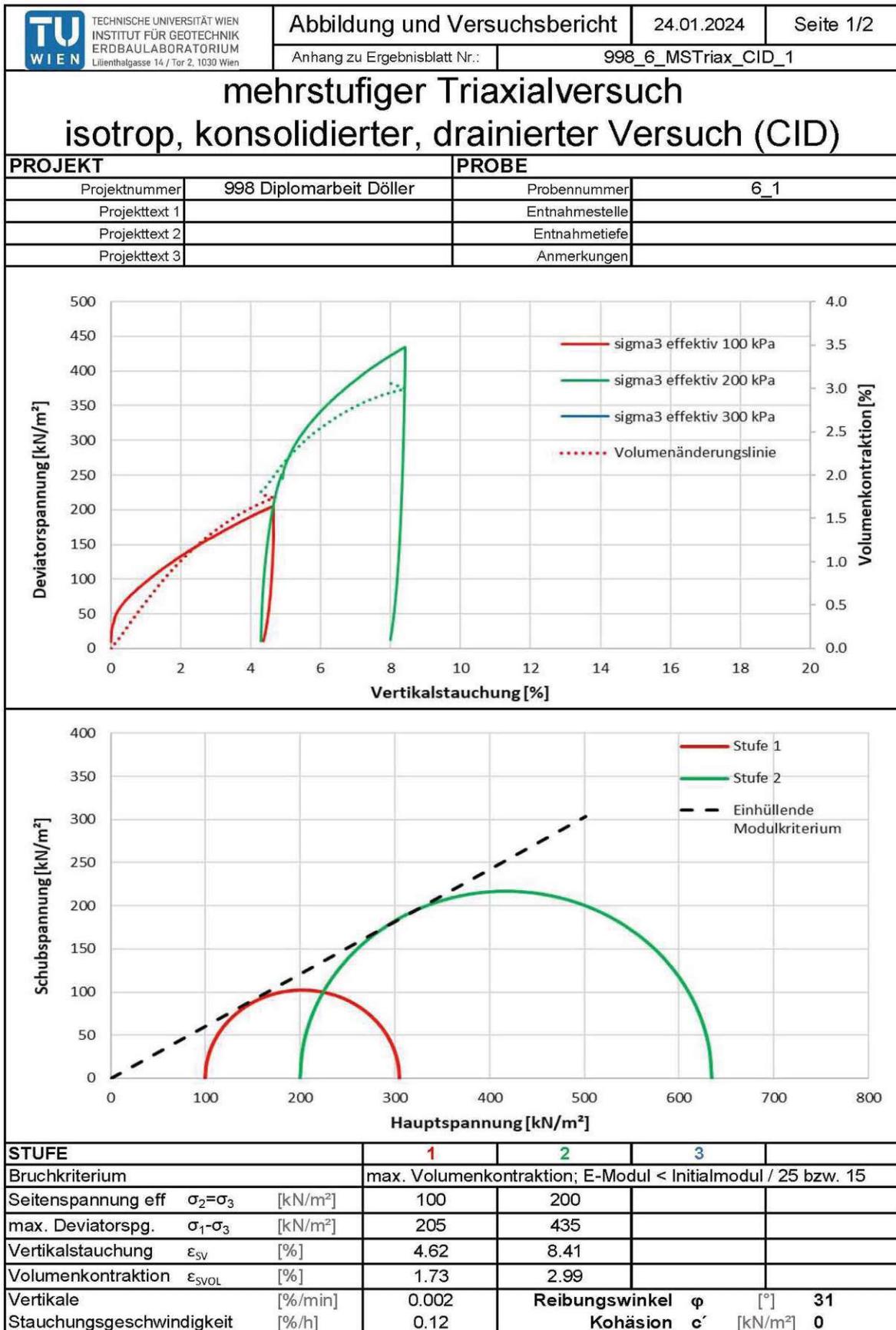


Abb. 6.21 Ergebnisprotokoll Versuch 998_6_MSTriax_1, Seite 1

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienhalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		24.01.2024	Seite 2/2
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		998_6_MSTriax_CID_1			
mehrstufiger Triaxialversuch isotrop, konsolidierter, drainierter Versuch (CID)					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	998 Diplomarbeit Döllner		Probennummer	6_1	
Projekttext 1			Entnahmestelle		
Projekttext 2			Entnahmetiefe		
Projekttext 3			Anmerkungen		
Probe vor Versuch			Probe nach Versuch		
					
<p>Probekörper bereits vor dem Versuch deformiert. Schadloser Einbau aufgrund zu geringer Konsistenz kaum möglich.</p>					
STUFE		1	2	3	
ANFANGSZUSTAND					
Probenqualität	u/g/a ^{*)}	a			
Probendurchmesser	d ₀ [mm]	96.0			
Probenhöhe	h ₀ [mm]	170.0			
Wasserg. Start	w ₀ [%]	12.5			
Feuchtdichte Start	ρ ₀ [g/cm ³]	2.28			
Trockendichte Start	ρ _{d0} [g/cm ³]	2.03			
KONSOLIDATION					
Drainagebedingungen d/ud ^{*)}		d	d		
effektive Spannung Kons. Ende	[kN/m ²]	100	200		
aufgebrachter Endgegenstand	[kN/m ²]	300	300		
Vertikalstauchung Kons. Ende	[%]	3.39	4.29		
Volumenkontraktion Kons. Ende	[%]				
Geschw. Vol.kontraktion Ende	[%/h]	<0.1%/h	<0.1%/h		
Endgültiger B-Wert	[%]	-			
weitere Anmerkungen:					

Abb. 6.22 Ergebnisprotokoll Versuch 998_6_MSTriax_1, Seite 2

6.7 Arbeitsschritt 7

6.7.1 Konventionelle Triaxialversuche mit dem Material 998_2

Nachdem das Material 998_6 nicht besonders gut geeignet war, um mit diesem weitere Versuche durchzuführen, wurde auf das Material 998_2 zurückgegriffen.

Da parallel zu den Triaxialversuchen der gegenständlichen Arbeit auch andere Triaxialversuche im Erdbaulabor der TU Wien durchgeführt wurden und nur eine Triaxialzelle für Probekörper >50 mm Durchmesser zur Verfügung stand, wurden für die weiteren Versuche Probekörper mit 40 mm Durchmesser herangezogen. Die Probekörper mit 40 mm Durchmesser konnten in eine kleinere Zelle eingebaut werden und außerhalb der Prüfpresse (UL60) vorgesättigt werden. Weiters war die Sättigungs- und Konsolidationsdauer aufgrund der kürzeren Wege bei den kleinen Probekörpern geringer als bei den größeren Probekörpern mit 70 bzw. 100 mm Durchmesser.

Die Herstellung der kleinen Probekörper erfolgte etwas anders als jene der Größeren. Um die Probekörper mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Höhe von ca. 80 mm herzustellen, wurden zu Beginn 1500 Gramm des trockenen Materials 998_2 mit 210 Gramm Wasser gemischt. Aufgrund der Restfeuchte im Material ergab dies einen Wassergehalt von etwa 14,5%. Mit diesem Wassergehalt ließen sich kompakte Probekörper herstellen. Um die Einbaudichte von $2,14 \text{ g/cm}^3$ (gleich wie bei den größeren Probekörpern mit Material 998_2) zu erreichen, wurden fünf Schichten mit je 40 Gramm in den teilbaren Zylinder, welcher in Abb. 6.23 dargestellt ist, eingebaut und jeweils mit 30 Schlägen mit dem Stahlbolzen verdichtet. In Abb. 6.24 ist ein Probekörper nach dem Ausbau aus dem geteilten Zylinder dargestellt. Von diesen Probekörpern wurden insgesamt sechs Stück hergestellt; drei davon für die konventionellen Triaxialversuche, einer für den mehrstufigen Triaxialversuch und zwei als Reserve.



Abb. 6.23 Herstellung der Probekörper mit 40 mm Durchmesser mit Material 998_2



Abb. 6.24 Probekörper 998_2_Triax_2A

Um die Scherparameter mit dem konventionellen Triaxialversuch zu ermitteln, wurden drei Versuche durchgeführt. Diese wurden mit Versuch A/B/C bezeichnet, wobei die effektive Seitenspannung für Versuch A mit 100 kPa, für Versuch B mit 300 kPa und für Versuch C mit 200 kPa festgelegt wurde.

Um die Prüfpresse UL60 möglichst kurz zu belegen, wurde der Probekörper des jeweiligen Versuches in die Triaxialzelle eingebaut und außerhalb der Prüfpresse vorgesättigt. Dabei wurde mit externen Druckerzeugern ein Sättigungsdruck („backpressure“) von 700 kPa aufgebracht und jeweils über eine Woche vorgesättigt. Anschließend wurde die Triaxialzelle in die Prüfpresse eingebaut und dort die Sättigung fortgesetzt bis der B-Test erfüllt war.

Nachdem die Konsolidation des ersten Teilversuches (Versuch A) abgeschlossen war, wurde die maximal zulässige Abschergeschwindigkeit ermittelt. Da die Schergeschwindigkeit für drainierte Versuche sehr langsam gewesen wäre, wurde der Abschervorgang nun undrainiert durchgeführt. Für diesen Fall ergab sich eine Schergeschwindigkeit von 0,005 mm/min. Diese wurde auch für die Versuche B und C, sowie für den Mehrstufenversuch verwendet.

Im Unterschied zu den drainierten Versuchen ist bei den undrainierten Versuchen die Messung des Porenwasserdruckes mit dem externen Porendrucksensor unbedingt erforderlich, um die effektiven Spannungen berechnen zu können. Die drei Versuche wurden jeweils bis zu einer Vertikalverformung von 15% abgesichert und anschließend beendet.

Bei der Auswertung der undrainierten Versuche wurde deutlich, dass die Messung der Volumenänderung nicht korrekt erfolgt, da Verluste bei dem Druckerzeuger für den Zelldruck auftraten. Dieser Umstand wurde in der Auswertung berücksichtigt, indem die Berechnung der korrigierten Querschnittsfläche nicht über die Volumenänderung, sondern über die Vertikalverformung durchgeführt wurde (wie in Kapitel 3.7.6 beschrieben, ist bei einem undrainierten Versuch das Probenvolumen konstant, sodass die aktuelle Querschnittsfläche nur von der Vertikalverformung abhängt). Dadurch konnte die Vertikalspannung σ_1 und somit auch die Deviatorspannung σ_D ohne Kenntnis der Volumenänderung berechnet werden.

Weiters erfolgte die Definition des Bruchpunktes nicht anhand der maximalen Deviatorspannung, sondern anhand des maximalen Spannungsverhältnisses (σ_1' / σ_3').

Die Ergebnisse der drei Versuche A/B/C des konventionellen Triaxialversuches sind in Abb. 6.25, Abb. 6.26, Abb. 6.27, Abb. 6.28, Abb. 6.29, Abb. 6.30 und Abb. 6.31 dargestellt.

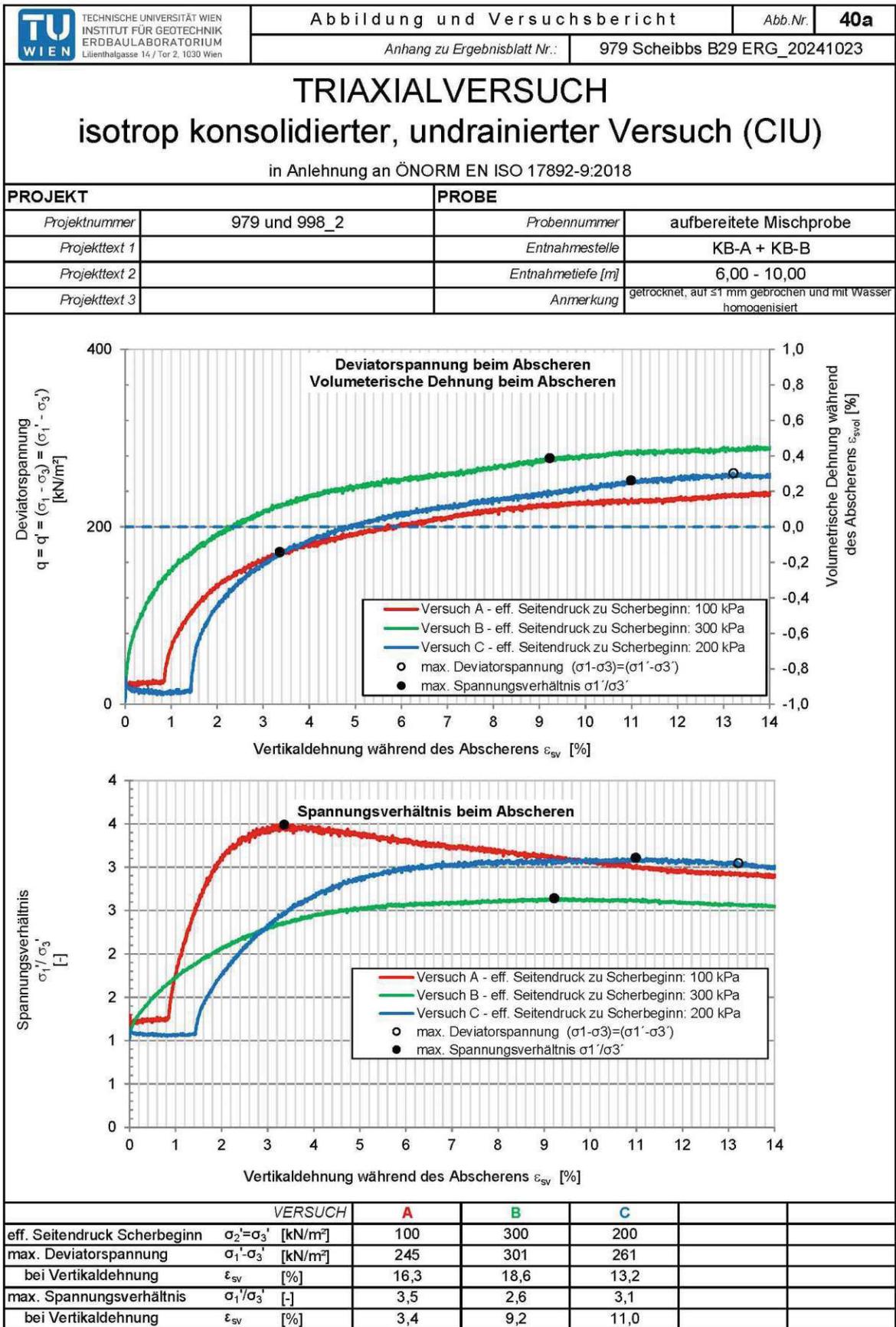


Abb. 6.25 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 1

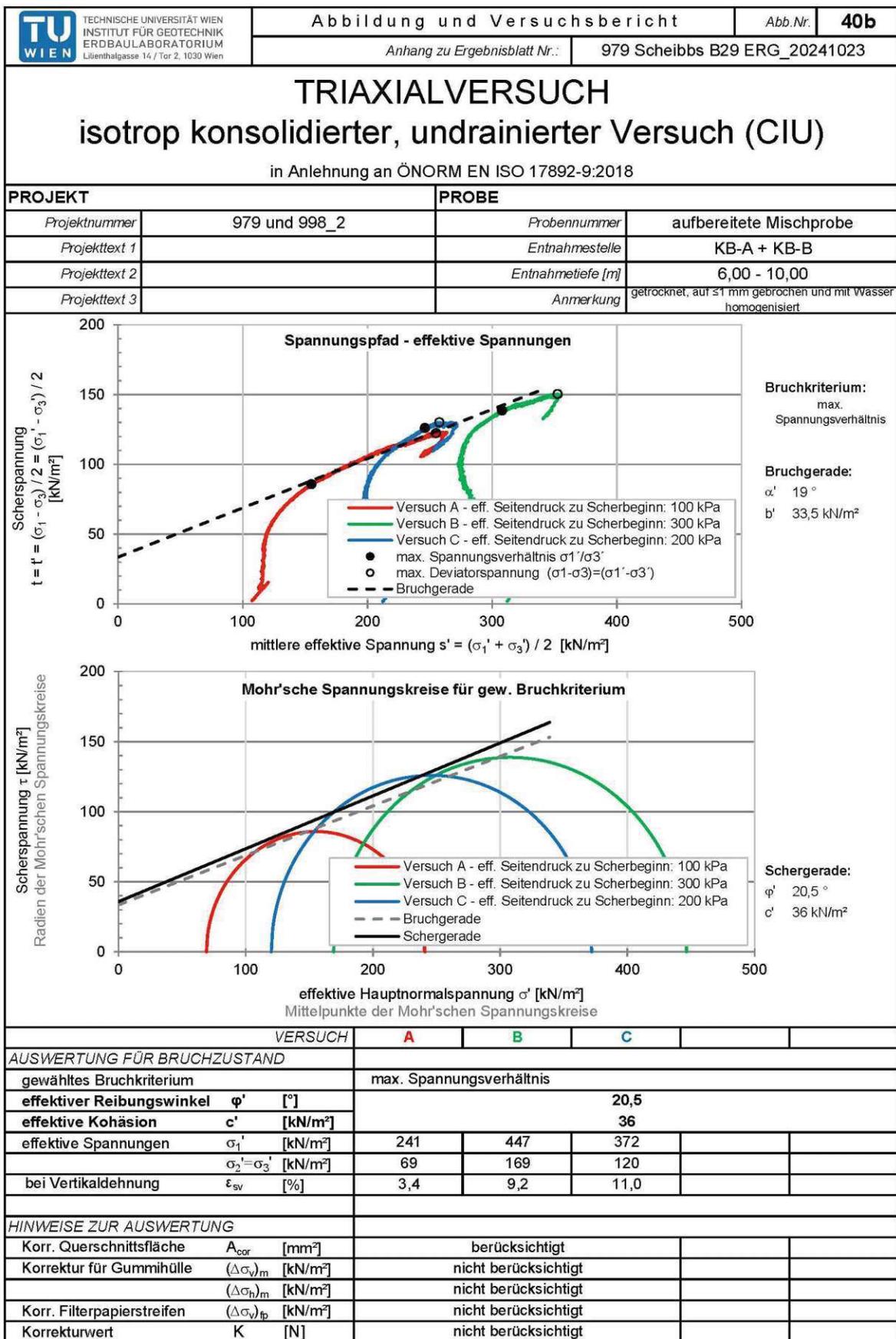


Abb. 6.26 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 2

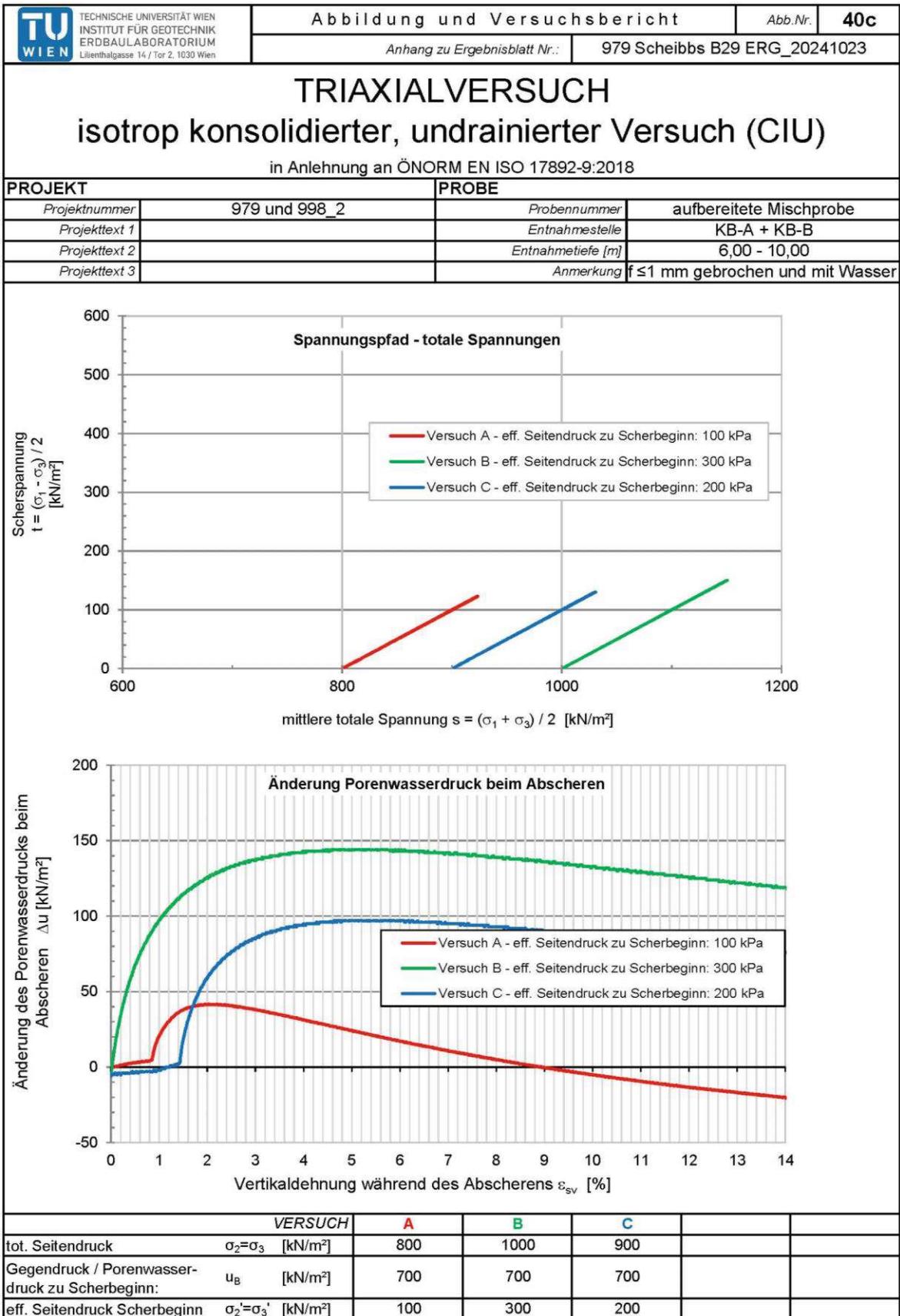


Abb. 6.27 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 3

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienhalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht			Abb.Nr. 40d	
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:			979 Scheibbs B29 ERG_20241023			
TRIAXIALVERSUCH						
isotrop konsolidierter, undrainierter Versuch (CIU)						
in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 17892-9:2018						
PROJEKT			PROBE			
Projektnummer	979 und 998_2		Probennummer	aufbereitete Mischprobe		
Projekttext 1			Entnahmestelle	KB-A + KB-B		
Projekttext 2			Entnahmetiefe [m]	6,00 - 10,00		
Projekttext 3			Anmerkung	f ≤ 1 mm gebrochen und mit Wasser		
VERSUCH						
A B C						
ALLGEMEINES						
visuelle Beschreibung Probekörper	sa' cl Si; feinkörnig	sa' cl Si; feinkörnig	sa' cl Si; feinkörnig	-	-	
Einbaudatum	-	-	-	-	-	
Prüftemperatur T [°C]	20	20	20	-	-	
Probekörperqualität (u...ungestört, g...gestört, a...aufbereitet)	a	a	a	-	-	
Anmerkung zur Probekörperherstellung	Proctordichte			-	-	
Versuchsverfahren (CIU, CAU, CID, CAD)	CIU	CIU	CIU	-	-	
ANFANGSZUSTAND						
Probekörperdurchmesser D_i [mm]	38,73	38,70	38,67	-	-	
Probekörperhöhe H_i [mm]	76,27	75,66	74,50	-	-	
Wassergehalt w_i [%]	14,1	14,1	14,1	-	-	
Boden-/Feuchtdichte ρ [g/cm ³]	2,05	2,10	2,08	-	-	
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,79	1,84	1,82	-	-	
Porenzahl ¹⁾ e [-]	0,53	0,49	0,51	-	-	
SÄTTIGUNG						
(End-)Gegendruck u_B [kN/m ²]	700	700	700	-	-	
Sättigungsdauer t [h]	250	309	233	-	-	
B-Wert [-]	0,94	0,93	0,98	-	-	
KONSOLIDIERUNG						
effektive Konsolidationsspannung [kN/m ²]	100	300	200	-	-	
Konsolidierung isotrop/anisotrop	isotrop	isotrop	isotrop	-	-	
Drainagebedingung	offen	offen	offen	-	-	
Gegendruck u_B [kN/m ²]	700	700	700	-	-	
NACH KONSOLIDIERUNG / VOR ABSCHEREN						
Probekörperhöhe H_c [mm]	74,66	73,61	74,02	-	-	
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,83	1,94	1,93	-	-	
Porenzahl ¹⁾ e [-]	0,50	0,41	0,42	-	-	
effektive Spannungen [kN/m ²]	100	300	200	-	-	
Vertikaldehnung ε_v [%]	2,11	2,71	0,64	-	-	
Volumetrische Dehnung ε_{vol} [%]	1,85	5,21	5,58	-	-	
ABSCHEREN						
Vertikale Dehungs- / Abschergeschwindigkeit v [mm/min] [%/h]	0,005 0,402	0,005 0,408	0,005 0,405	-	-	
NACH ABSCHEREN						
Ausbauwassergehalt w_e [%]	19,0	18,8	18,5	-	-	
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,83	1,94	1,93	-	-	
Porenzahl ¹⁾ e [-]	0,50	0,41	0,42	-	-	
ANMERKUNGEN						
*) Porenzahl mit folgender Korndichte (Messung) berechnet [g/cm ³]: 2,74						
Anstelle der in ÖNORM EN ISO 17892-9:2018 angeführten Indizes v (vertikal) und h (horizontal) bei den Spannungen wurden die Indizes 1 bzw. 2,3 verwendet ($\sigma_v = \sigma_1$ bzw. $\sigma_h = \sigma_2 = \sigma_3$).						

Abb. 6.28 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 4

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienthalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		Abb.Nr.	40e
		Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		979 Scheibbs B29 ERG_20241023	
<h2>TRIAXIALVERSUCH</h2> <h3>isotrop konsolidierter, undrainierter Versuch (CIU)</h3> <p>in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 17892-9:2018</p>					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	979 und 998_2		Probennummer	aufbereitete Mischprobe	
Projekttext 1			Entnahmestelle	KB-A + KB-B	
Projekttext 2			Entnahmetiefe [m]	6,00 - 10,00	
Projekttext 3			Anmerkung	f ≤ 1 mm gebrochen und mit Wasser	
FOTODOKUMENTATION VERSUCH A					
					
Probekörper vor Versuch					
					
Probekörper nach Versuch (getrocknet)					
Beschreibung des Bruchs:					
Keine ausgeprägte Bruchfläche; Ausbauchung des Probekörpers. Innere Struktur weist keine Partikeln größer 1/10 des Probekörperdurchmessers auf.					

Abb. 6.29 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 5

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienthalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien		Abbildung und Versuchsbericht		Abb.Nr.	40f
		Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		979 Scheibbs B29 ERG_20241023	
<h2>TRIAXIALVERSUCH</h2> <h3>isotrop konsolidierter, undrainierter Versuch (CIU)</h3> <p>in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 17892-9:2018</p>					
PROJEKT			PROBE		
Projektnummer	979 und 998_2		Probennummer	aufbereitete Mischprobe	
Projekttext 1			Entnahmestelle	KB-A + KB-B	
Projekttext 2			Entnahmetiefe [m]	6,00 - 10,00	
Projekttext 3			Anmerkung	f ≤ 1 mm gebrochen und mit Wasser	
FOTODOKUMENTATION VERSUCH B					
					
Probekörper vor Versuch					
					
Probekörper nach Versuch (getrocknet)					
Beschreibung des Bruchs:					
Keine ausgeprägte Bruchfläche; Ausbauchung des Probekörpers. Innere Struktur weist keine Partikeln größer 1/10 des Probekörperdurchmessers auf.					

Abb. 6.30 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 6

	TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienthalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien	Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	40g
			Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	979 Scheibbs B29 ERG_20241023
<h2 style="margin: 0;">TRIAXIALVERSUCH</h2> <h3 style="margin: 0;">isotrop konsolidierter, undrainierter Versuch (CIU)</h3> <p style="margin: 0;">in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 17892-9:2018</p>				
PROJEKT		PROBE		
Projektnummer	979 und 998_2	Probennummer	aufbereitete Mischprobe	
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB-A + KB-B	
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	6,00 - 10,00	
Projekttext 3		Anmerkung	f ≤ 1 mm gebrochen und mit Wasser	
FOTODOKUMENTATION VERSUCH C				
				
Probekörper vor Versuch				
				
Probekörper nach Versuch beim Ausbau (links) und ohne Latexhülle (rechts)				
Beschreibung des Bruchs:				
Ausbildung einer sprödebruchartigen Bruchfläche sowie Ausbauchung des Probekörpers. Innere Struktur weist keine Partikel größer 1/10 des Probekörperdurchmessers auf.				

Abb. 6.31 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_Triax_2, Seite 7

6.7.2 Mehrstufiger Triaxialversuch mit dem Material 998_2

Nachdem die konventionellen Versuche abgeschlossen waren, wurde ein mehrstufiger Triaxialversuch durchgeführt. Ziel war es, das Modul-Abbruchkriterium zu testen und anschließend die Ergebnisse mit den konventionellen Versuchen zu vergleichen. Um die Ergebnisse bestmöglich vergleichen zu können, wurde beim mehrstufigen Versuch der Abschervorgang ebenfalls undrainiert durchgeführt (CIU-Versuch).

Die Herstellung und Beschreibung des Probekörpers erfolgten bereits in Kapitel 6.7.1. Der Probekörper wurde abermals in die Triaxialzelle eingebaut und mit 700 kPa (backpressure) vorgesättigt. Anschließend wurde die Triaxialzelle in die Prüfpresse eingebaut und die Sättigung fortgesetzt, bis der B-Test erfüllt war.

Nachdem die erste Konsolidationsphase, welche bei einem totalen Zelldruck von 800 kPa und einem Porenwasserdruck von 700 kPa durchgeführt wurde (entspricht einer effektiven Spannung von 100 kPa), abgeschlossen war, erfolgte der erste Schervorgang. Bei diesem kam es aufgrund einer schlechten Definition des Modul-Abbruchkriteriums in der Prüfvorschrift bereits bei 0,3% Vertikalstauchung zum Abbruch. Aufgrund dessen wurde der Versuch beendet, der Fehler behoben und der Versuch neu gestartet.

Um Ergebnisse zu erhalten, welche möglichst wenig durch den Neustart beeinflusst sind, wurden die effektiven Seitendruckspannungen für die drei Stufen nach dem Neustart auf 200/250/300 kPa festgelegt. Nachdem die Konsolidation der ersten Stufe abgeschlossen war, wurde der erste Abschervorgang bis zum Erreichen des Kriteriums (Tangentenmodul < Initialmodul/25) durchgeführt. Sobald das Kriterium erfüllt war, wurde der Versuch durch die Prüfvorschrift unterbrochen, die Deviatorspannung zurückgefahren und der Zelldruck auf die nächste Stufe erhöht. Dieser Vorgang wiederholte sich für die Stufen zwei und drei, wobei die dritte Stufe nach dem Erreichen des Kriteriums plangemäß nicht abgebrochen wurde, sondern bis zu einer Vertikalverformung von 18% durchgeführt wurde.

Bei der Auswertung wurde die Berechnung der korrigierten Querschnittsfläche wieder anhand der Vertikalverformung durchgeführt, sodass die Werte für die totale Vertikalspannung und die Deviatorspannung mit jenen des konventionellen Versuches vergleichbar waren. Weiters wurde als Versagenskriterium bei der letzten Stufe (Stufe 3 ult) anstatt der maximalen Deviatorspannung auch das maximale Spannungsverhältnis (σ_1' / σ_3') angewendet.

Die Ergebnisse sind in Abb. 6.32 und Abb. 6.33 dargestellt.

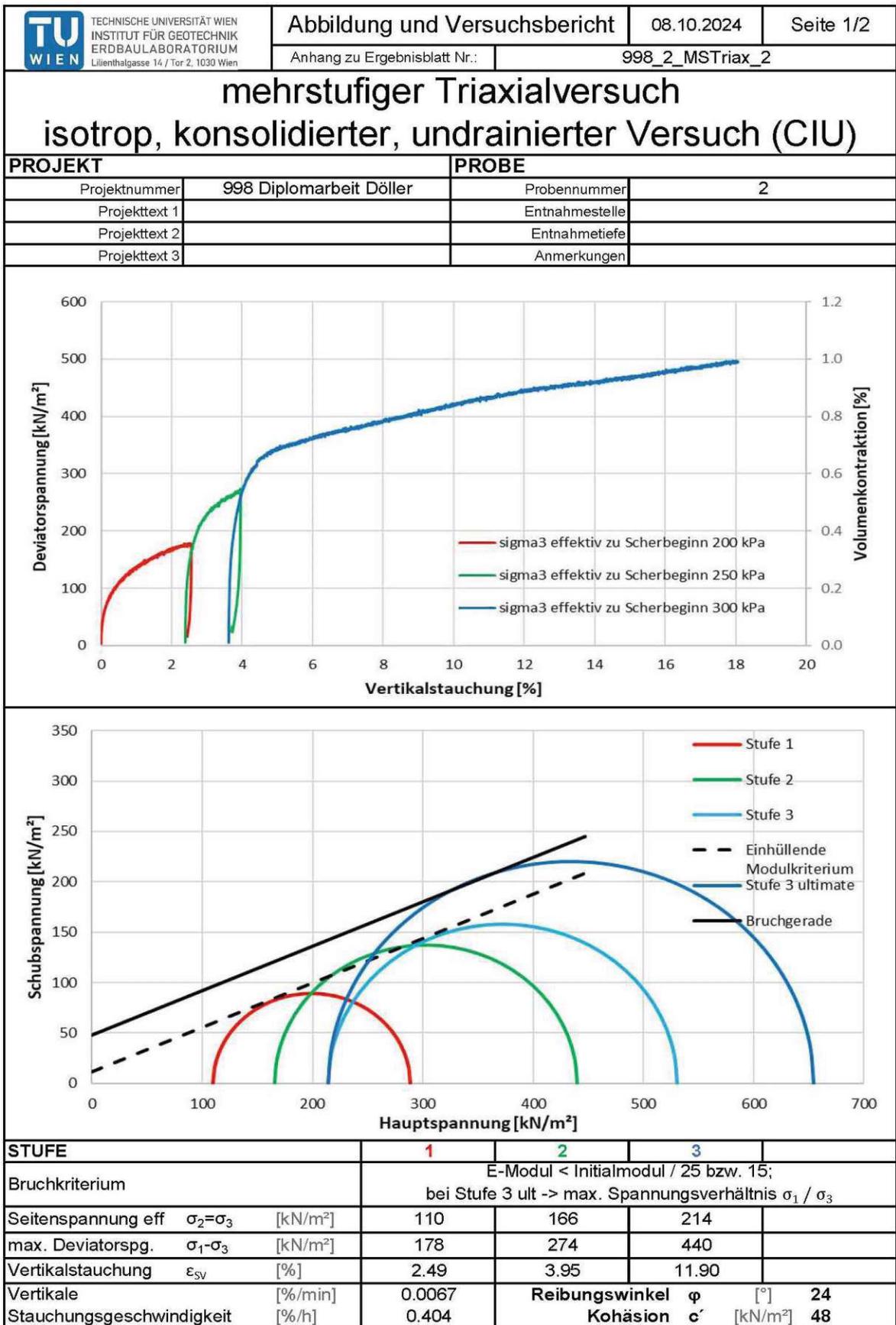


Abb. 6.32 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_MSTriax_2, Seite 1

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN INSTITUT FÜR GEOTECHNIK ERDBAULABORATORIUM Lilienthalgasse 14 / Tor 2, 1030 Wien	Abbildung und Versuchsbericht		08.10.2024	Seite 2/2
	Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:		998_2_MSTriax_2	
mehrstufiger Triaxialversuch isotrop, konsolidierter, undrainierter Versuch (CIU)				
PROJEKT			PROBE	
Projektnummer	998 Diplomarbeit Döllner		Probennummer	2
Projekttext 1			Entnahmestelle	
Projekttext 2			Entnahmetiefe	
Projekttext 3			Anmerkungen	
Probe vor Versuch			Probe nach Versuch	
				
STUFE				
	1	2	3	
ANFANGSZUSTAND				
Probenqualität	u/g/a ^{*)}		a	
Probendurchmesser	d ₀	[mm]	38.8	
Probenhöhe	h ₀	[mm]	74.3	
Wasserg. Start	w ₀	[%]	14.5	
Feuchtdichte Start	ρ ₀	[g/cm ³]	2.05	
Trockendichte Start	ρ _{d0}	[g/cm ³]	1.79	
KONSOLIDATION				
Drainagebedingungen	d/ud ^{*)}		d	d
effektive Spannung Kons. Ende	[kN/m ²]		200	250
aufgebrachter Endgegenndruck	[kN/m ²]		700	700
Vertikalstauchung Kons. Ende	[%]		1.73	2.36
Volumenkontraktion Kons. Ende	[%]			
Geschw. Vol.kontraktion Ende	[%/h]		<0.1%/h	<0.1%/h
Endgültiger B-Wert	[%]		-	
weitere Anmerkungen:				

Abb. 6.33 Ergebnisprotokoll Versuch 998_2_MSTriax_2, Seite 2

6.7.3 Vergleich der konventionellen- und der mehrstufigen Triaxialversuche mit dem Material 998_2

Die Scherparameter, welche durch den konventionellen Triaxialversuch ermittelt wurden, ergaben einen Reibungswinkel von $\varphi' = 20,5^\circ$ und eine Kohäsion von $c' = 38 \text{ kN/m}^2$. Beim mehrstufigen Versuch ergaben sich die Scherparameter zu $\varphi' = 24^\circ$ und $c' = 48 \text{ kN/m}^2$. Diese Ergebnisse sind grundsätzlich in einer ähnlichen Größenordnung und passen somit einigermaßen zusammen.

Betrachtet man jedoch die einzelnen *Mohr'schen* Spannungskreise des konventionellen und des mehrstufigen Versuches, welche in Abb. 6.34 gegenübergestellt sind, so fällt auf, dass die Hauptspannungswerte σ_1' der jeweiligen Seitendruckstufen nicht gut übereinstimmen. Auffällig ist dabei vor Allem der geringe Wert der Hauptspannung $\sigma_1' = 455 \text{ kN/m}^2$ des Versuches B (effektive Konsolidationsspannung von 300 kN/m^2) bei den konventionellen Versuchen. Vergleicht man diese mit jener des mehrstufigen Versuches, welcher eine Hauptspannung $\sigma_1' = 654 \text{ kN/m}^2$ aufweist, so liegt hier eine große Differenz vor, welche nicht erklärbar ist. Die beiden Spannungen sollten aufgrund derselben Seitendruckstufe in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Auch die beiden *Mohr'schen* Kreise bei der Seitendruckstufe $\sigma_{3,\text{eff}} = 200 \text{ kPa}$ haben eine unterschiedliche Größenordnung. Diese Abweichungen sind aus bodenmechanischer Sicht nicht zu erklären. Auch aufgrund des mehrstufigen Versuchsablaufes sind diese Unterschiede nicht zu erklären, da sich bei den anderen mehrstufigen Versuchen nicht solche Abweichungen ergeben haben.

Aufgrund dieser Diskrepanzen können derzeit keine endgültigen Aussagen über das Modul-Abbruchkriterium getroffen werden. Um valide Aussagen treffen zu können, müssen wesentlich mehr Versuchsergebnisse vorliegen. Dies soll Aufgabe zukünftiger Forschungstätigkeiten sein.

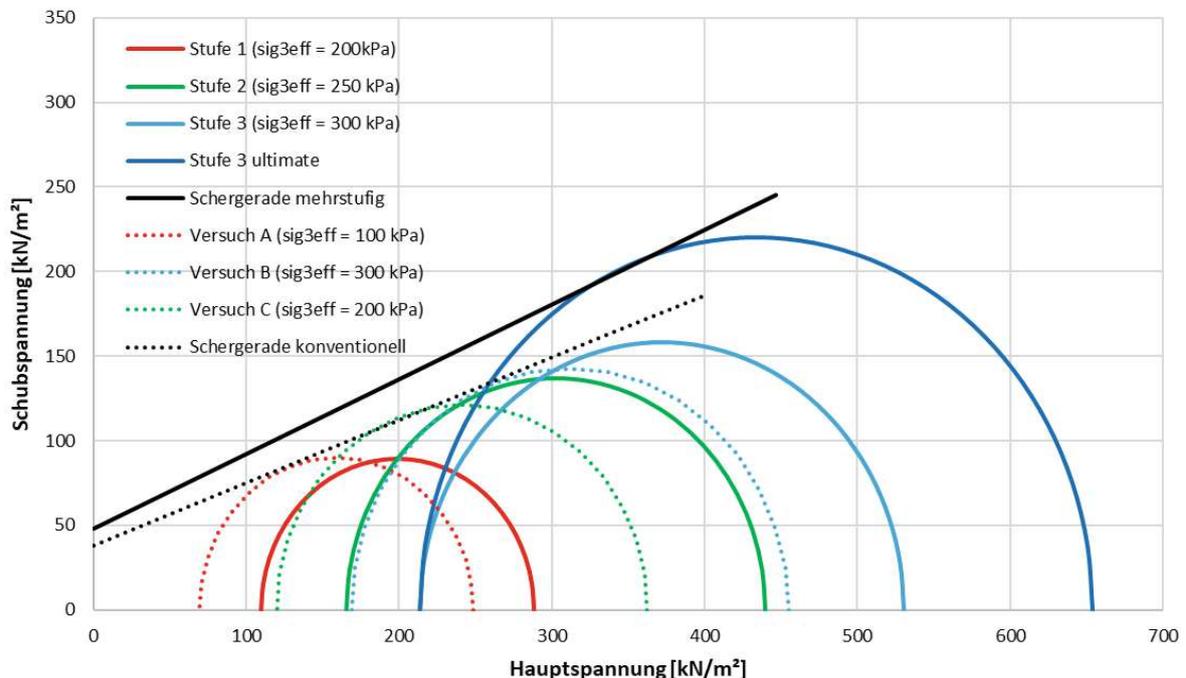


Abb. 6.34 Vergleich der *Mohr'schen* Spannungskreise des mehrstufigen (durchgezogene Linien) und des konventionellen (punktierte Linien) Triaxialversuches mit dem Material 998_2

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die gegenständliche Diplomarbeit befasst sich mit der Anwendung der Mehrstufentechnik bei Triaxialversuchen an Lockergesteinsproben.

Zu Beginn wurden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen des Triaxialversuches erläutert. Dabei war vor Allem die Definition der Scherparameter Reibungswinkel und Kohäsion von großer Bedeutung.

Weiters wurde in Kapitel 3 der konventionelle Triaxialversuch erläutert. Dabei wurde zuerst allgemein die Anwendung des Triaxialversuches beschrieben. Anschließend wurde die Triaxialversuchsanlage, die Probenvorbereitung, der Ablauf der Versuchsdurchführung sowie die österreichische Normenlage erläutert. Weiters wurden die einzelnen Versuchsabschnitte, welche in der Prüfvorschrift definiert sind, im Detail beschrieben. Die Prüfvorschrift steuert die Triaxialversuchsanlage über die Software GEOsys.

Im Kapitel 4 wurde anschließend der mehrstufige Triaxialversuch behandelt. Dabei wurden zuerst die allgemeine Vorgehensweise sowie die Anwendbarkeit des Verfahrens erläutert. Weiters wurden Regelwerke sowie einzelne wissenschaftliche Arbeiten zur Durchführung von mehrstufigen Triaxialversuchen beschrieben. Großes Augenmerk wurde in diesem Kapitel auch auf die Definition eines Abbruchkriteriums für die einzelnen Stufen des Mehrstufenversuches gelegt. Zu diesem Thema wurden ebenfalls einzelne wissenschaftliche Texte erläutert. Weiters wurde auf die Auswertung, speziell die Konstruktion der Bruchgeraden, bei mehrstufigen Triaxialversuchen eingegangen. Anhand der beschriebenen wissenschaftlichen Arbeiten wurde schlussendlich ein mehrstufiges Prüfverfahren mit zwei verschiedenen Abbruchkriterien für die gegenständliche Arbeit definiert. Dieses Prüfverfahren, sowie die Programmierung dieses Verfahrens in der Prüfvorschrift von GEOsys wurden in Abschnitt 4.6 beschrieben.

Zusammenfassend wurde für diese Arbeit Folgendes für die Anwendung der Mehrstufentechnik bei Triaxialversuchen an Lockergesteinsproben festgelegt:

- Versuchsdurchführung:
Nach Sättigung der Bodenprobe wird in der ersten Stufe ein effektiver Seitendruck (z.B. 100 kPa) zur ersten Konsolidierung der Bodenprobe aufgebracht und anschließend die Axialspannung und damit die Deviatorspannung bis zum ersten „stopping point“ erhöht. Ist dieser erreicht, wird die Axialspannung wieder reduziert, bis die Deviatorspannung nahezu null ist.
Anschließend wird auf die nächste effektive Seitendruckspannung (z.B. 300 kPa) erhöht, die Probe unter dieser Spannung konsolidiert und anschließend der zweite Abschervorgang gestartet. Die Axialspannung und damit die Deviatorspannung wird wieder erhöht, bis der zweite „stopping point“ erreicht ist. Danach wird die Axialspannung wieder reduziert, bis die Deviatorspannung wiederum nahezu null ist.
Anschließend wird die dritte Seitendruckstufe aufgebracht (z.B. 500 kPa) und die Konsolidationsphase abgewartet. Nach Abschluss der dritten Konsolidation wird der dritte Abschervorgang eingeleitet, wobei dieser nicht abgebrochen wird, sondern im

Normalfall bis zur Maximaldehnung (zumindest 15%) bzw. bis zum vollständigen Bruch ausgeführt wird.

Um die spätere Auswertung zu erleichtern, wird während des dritten Abschervorganges ebenso der „stopping point“ rechnerisch ermittelt; der Abschervorgang wird aber nicht unterbrochen.

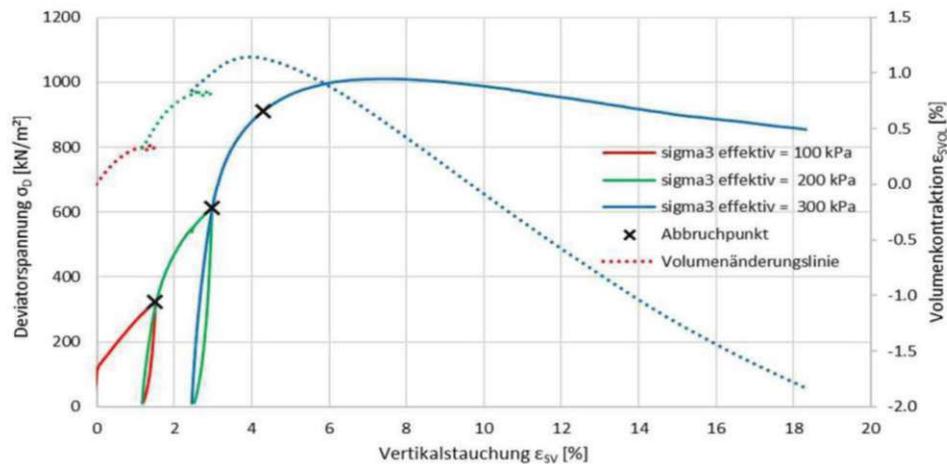


Abb. 7.1: Beispiel einer Spannungs-Dehnungs-Kurve für einen Mehrstufenversuch, bei dem das Volumenkriterium als Abbruchkriterium („stopping point“) zur Anwendung kam

- Abbruchkriterien („stopping points“):

Es wurden die folgenden zwei Abbruchkriterien definiert:

- Modulkriterium (Tangentenmodul):

- Initialmodul E_i wird bei 0,25% Vertikalverformung berechnet
- Der beim Abschervorgang aktuell vorhandene Modul E_r wird laufend berechnet; der Abschervorgang wird abgebrochen, wenn folgendes Kriterium erreicht ist:
 - bei Stufe 1: $E_i / E_r = 25 \rightarrow E_{m_ini} / E_{m_01} = 25$
 - bei Stufe 2: $E_i / E_r = 15 \rightarrow E_{m_ini} / E_{m_01} = 15$

- Volumenkriterium:

Das aktuell vorhandene Probekörpervolumen wird laufend erfasst. Daraus wird die aktuell vorhandene Volumenänderung berechnet. Ist diese positiv, so steigt die Volumenänderung und es herrscht demnach noch Volumenkontraktion. Ist diese jedoch negativ, so ist der Umkehrpunkt erreicht und die Probe beginnt sich aufzulockern. Sobald dieser Umkehrpunkt erreicht wird, wird der Abschervorgang abgebrochen. Dies wurde folgendermaßen in der Prüfvorschrift programmiert:

- $d\varepsilon_v / d\varepsilon_a < 0 \rightarrow dV < -0,02 \text{ ml}$

Anmerkungen:

- Der Wert -0,02 wurde gewählt, um messwertbedingte Streuungen auszugleichen.
- Bei einem undrainierten Versuch ist das Probekörpervolumen beim Abschervorgang konstant. Aus diesem Grund kann bei einem undrainierten Versuch nur das Modulkriterium angewendet werden.

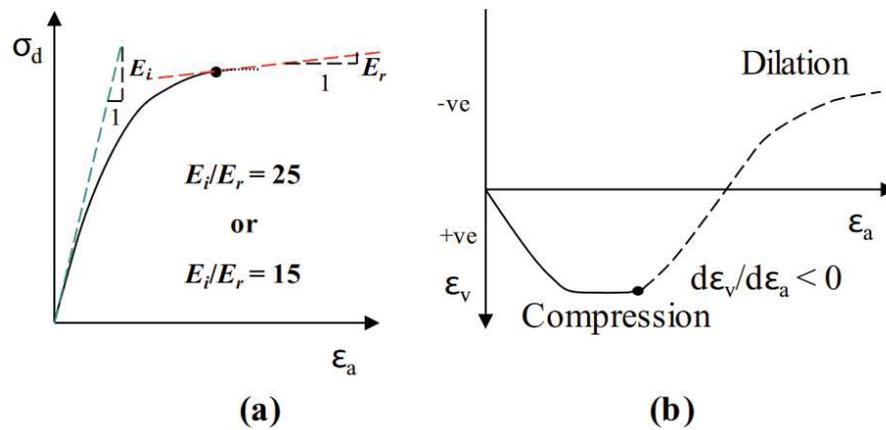


Abb. 7.2: Definition der beiden Abbruchkriterien [20]

- Konstruktion der Bruchgeraden:
 - In der Literatur [17] [19] [21] wird die Konstruktion der Bruchgerade nur bei Anwendung des Volumenkriteriums beschrieben. Es wird dabei so vorgegangen, dass für die ermittelten „stopping points“ die entsprechenden *Mohr'schen* Kreise aufgetragen und anschließend eine Einhüllende („Non-Failure Envelope“) an die *Mohr'schen* Kreise angelegt wird. Die letzte Stufe hat einen *Mohr'schen* Kreis mit der Deviatorspannung des Versagens/Bruches. Wie in nachfolgender Abbildung dargestellt, wird die Einhüllende („Non-Failure Envelope“) parallel verschoben, sodass diese an den größten *Mohr'schen* Kreis beim ermittelten Versagen/Bruch anliegend ist. Daraus werden letztlich die Scherparameter (Reibungswinkel und Kohäsion) ermittelt.

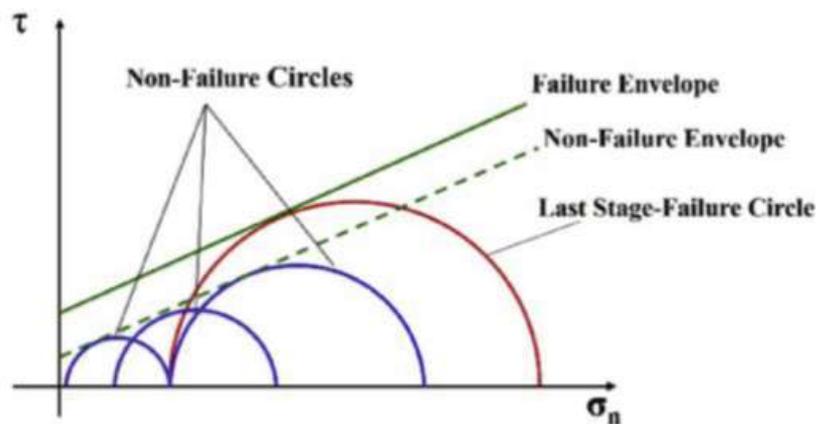


Abb. 7.3: Konstruktion der Bruchgeraden [19]

- In der Literatur konnten keine Referenzen gefunden werden, wie die Bruchgerade zu ermitteln ist, wenn das Modulkriterium zur Anwendung kommt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass bei diesem „stopping point“ ebenfalls ein Vorbruch im Probekörper auftritt und aus diesem Grund wurde die gleiche Auswerterroutine wie beim Volumenkriterium angewendet. Es ist jedoch nochmals darauf hinzuweisen, dass diese Auswertemethodik nicht

auf der vorhandenen Literatur basiert und somit im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten zu bestätigen wäre.

- Dass bei einem Probekörper bei einer Stufe das eine Kriterium und bei einer anderen Stufe das andere Kriterium greift, davon ist nicht auszugehen, da das Materialverhalten entweder eher spröde oder eher plastisch ist.

Nachdem in den ersten vier Kapiteln die Theorie zu den mehrstufigen Triaxialversuchen erläutert wurde, wurden schließlich in Kapitel 5 und 6 die durchgeführten Laborversuche beschrieben.

In Kapitel 5 ist dazu zu Beginn eine Übersicht über die verschiedenen Probematerialien sowie über sämtliche durchgeführte Laborversuche dargestellt. Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Böden untersucht, wobei drei Böden (998_2, 998_5 und 998_6) für die Mehrstufentechnik ausgewählt wurden. Mit diesen Böden wurden insgesamt sieben Mehrstufenversuche durchgeführt, um die fertige Prüfvorschrift zu entwickeln.

Weiters wurde erläutert, wie geeignete Probekörper für die Erarbeitung der Mehrstufentechnik identifiziert und hergestellt werden. Wesentlich ist, dass sich ein mögliches Versagen des Probekörpers im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ankündigt und kein plötzliches Versagen auftritt. Demnach sind Böden mit plastischem Bruchverhalten wesentlich besser für die Mehrstufentechnik geeignet als Böden mit einem spröden Bruchverhalten. Dies ist anschaulich in nachfolgender Abbildung dargestellt.

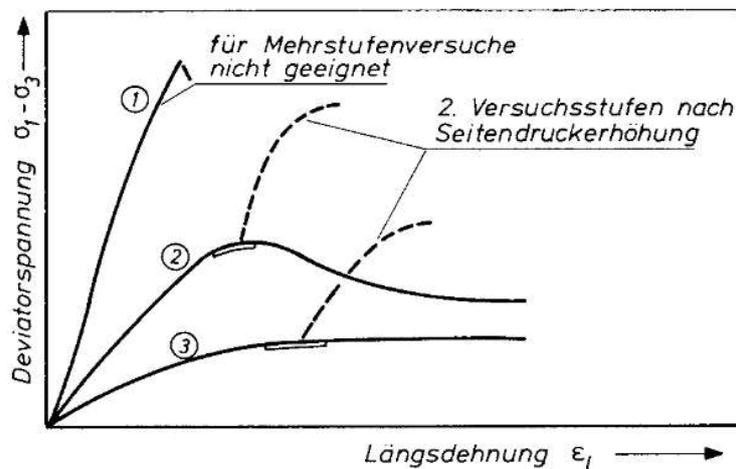


Abb. 7.4: Anforderungen an das Probenmaterial zur Anwendbarkeit der Mehrstufenversuchstechnik. [13]

In Kapitel 6 sind sämtliche durchgeführte konventionelle und mehrstufige Triaxialversuche beschrieben. Diese wurden anhand der einzelnen Arbeitsschritte gegliedert, welche zur Erstellung des Prüfablaufes und der Prüfvorschrift durchgeführt wurden. Bei den einzelnen Versuchen wurden jeweils zuerst die Details des untersuchten Probekörpers beschrieben. Anschließend wurde der Versuchsablauf mit den etwaig aufgetretenen Problemen beschrieben. Es zeigte sich, dass immer wieder Probleme in der (noch nicht fertiggestellten) Prüfvorschrift oder Probleme mit der Versuchsanlage auftraten, die im Zuge der einzelnen Arbeitsschritte zu beheben waren. Dennoch konnten die Versuche jeweils beendet werden und dienten damit der Entwicklung der Prüfvorschrift zu einer automatisierten Versuchsdurchführung. Sämtliche Einzelergebnisse sind in den entsprechenden Kapiteln dargestellt.

Zur Verifizierung der Prüfvorschrift unter Anwendung des Volumenkriteriums dienten die Versuche mit dem eher gröberen Boden 998_5 ($c' \text{ si sa}^* \text{ Gr}$), mit dem insgesamt drei konventionelle Triaxialversuche (mit unterschiedlichen Seitendruckspannungen) und vier Mehrstufenversuche unter drainierten Bedingungen durchgeführt wurden. Im Kapitel 6.5.6 wurden die Versuche einander gegenübergestellt und es hat sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse ergeben, wie in nachfolgender Abbildung nochmals dargestellt ist.

	Reibungswinkel	Kohäsion	$\sigma_{3,\text{eff}} = 100 \text{ kPa}$		$\sigma_{3,\text{eff}} = 200 \text{ kPa}$		$\sigma_{3,\text{eff}} = 300 \text{ kPa}$	
	φ	c'	max σ_D	ϵ_{SV}	max σ_D	ϵ_{SV}	max σ_D	ϵ_{SV}
konventioneller Versuch	38.0	27.0	427.0	3.4	776.0	5.1	1072.0	6.9
Mehrstufenversuch 1	36.5	32.0	323.0	1.5	612.0	3.0	1011.0	7.5
Mehrstufenversuch 2	38.0	27.0	330.0	2.1	650.0	3.7	1070.0	8.4
Mehrstufenversuch 3	36.0	18.0	296.0	2.1	578.0	4.0	903.0	8.2
Mehrstufenversuch 4*	39.0	26.0	501.0	5.5	847.0	8.7	1163.0	10.7

* $\sigma_{3,\text{eff}} = 120/220/320$ & Sättigung mit backpressure

Abb. 7.5: Vergleich der Ergebnisse der mehrstufigen und konventionellen Triaxialversuche mit dem Material 998_5. Für die Auswertung des konventionellen Versuches wurde die maximale Deviatorspannung als Bruchkriterium zugrunde gelegt.

Zur Verifizierung der Prüfvorschrift unter Anwendung des Modulskriteriums dienten die Versuche mit dem feinkörnigen Boden 998_2 ($\text{sa}' \text{ cl Si}$), mit dem insgesamt drei konventionelle Triaxialversuche (mit unterschiedlichen Seitendruckspannungen) und ein Mehrstufenversuch durchgeführt wurden. Bei diesen Versuchen wurde mit „backpressure“ gearbeitet, um die Probensättigung zu erreichen und der Abschervorgang erfolgte sowohl bei den konventionellen Versuchen als auch bei den Mehrstufenversuchen jeweils undrainiert. Im Kapitel 6.7.3 wurden die Ergebnisse wieder einander gegenübergestellt, wobei sich Folgendes ergeben hat:

- Konventionelle Versuche: $\varphi' = 20,5^\circ$ und $c' = 38 \text{ kN/m}^2$ (Anmerkung: für die Auswertung wurde das maximale Spannungsverhältnis σ_1' / σ_3' als Bruchkriterium zugrunde gelegt)
- Mehrstufenversuch: $\varphi' = 24^\circ$ und $c' = 48 \text{ kN/m}^2$

Die Scherparameter liegen zwar in einer ähnlichen Größenordnung, jedoch war das im Versuch gemessene Spannungsniveau unterschiedlich (beim Mehrstufenversuch deutlich höher als bei den konventionellen Versuchen). Die Ursache dafür ist nicht bekannt und es müssten somit weitere Versuche durchgeführt werden, um die Anwendung des Modulskriteriums zu validieren. Folgendes wäre dabei zu überprüfen/erforschen, da dazu bislang kaum Ergebnisse publiziert wurden:

- Anwendung der Mehrstufentechnik bei undrainierten Versuchen mit „backpressure“
- Konstruktion der Bruchgeraden bei Anwendung des Modulskriteriums
- Anwendung des maximalen Spannungsverhältnisses σ_1' / σ_3' als Bruchkriterium

Abschließend ist festzuhalten, dass im Rahmen dieser Arbeit eine Prüfvorschrift zur automatisierten Durchführung von Mehrstufenversuchen erarbeitet und getestet wurde. Für eine breite Anwendung sind jedoch weitere Versuche durchzuführen, um die Prüfvorschrift zu verbessern sowie valide Aussagen über die Anwendbarkeit der Abbruchkriterien geben zu können.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *ÖNORM EN ISO 17892-9: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 9: Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden.* Austrian Standards: Wien, 2018.
- [2] *ÖNORM EN ISO 17892-8: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 8: Unkonsolidierter undrännierter Triaxialversuch.* Austrian Standards: Wien, 2018.
- [3] Kolymbas, D.: *Geotechnik.* Springer, 2016.
- [4] Adam, D.: *Grundbau und Bodenmechanik, Studienunterlagen zur Vorlesung.* Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden und Felsmechanik, Technische Universität Wien, Wien, 2019.
- [5] von Soos, P. and Engel, J.: *Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor,* K.J. Witt, Editor. Germany: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG., 2017.
- [6] Brandl, H.: *Vom Grundbau zur Bodenmechanik – von der Bodenmechanik zur Geotechnik. in Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik 2015.* Springer, Berlin Heidelberg, 2015.
- [7] Schmitt, J., Burbaum, U. and Bormann, A.: *Festigkeit und Formänderungseigenschaften der Böden.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021.
- [8] *WILLE Product Catalogue, Edition 2016.*
- [9] Yi, S.: *Untersuchung der Scherfestigkeit eines sandigen Schluffes im gesättigten und teilgesättigten Zustand mittels drainierter triaxialer Druckversuch,* in *Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für Geotechnik.* Universität für Bodenkultur Wien, 2015.
- [10] *ÖNORM EN ISO 17892-2: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 2: Bestimmung der Dichte des Bodens.* Austrian Standards, Wien, 2023.
- [11] Wesche, W.: *Stoffgrößen,* in *Radiale Kreiselpumpen: Berechnung und Konstruktion der Hydrodynamischen Komponenten.* Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2016.
- [12] *ÖNORM EN ISO 17892-5: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung,* Austrian Standards, Wien, 2017.
- [13] Wichter, L.: *Empfehlung Nr. 12: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen.* Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG., 2022.

- [14] Ernst, C., Hecht, T. and Witt, K.J.: *In-situ-Bestimmung von effektiven Scherparametern in rutschgefährdeten Schichten im Oberen Buntsandstein*. geotechnik, 39(2): p. 110-118, 2016.
- [15] Youn, H. and Tonon, F.: *Multi-stage triaxial test on brittle rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(4): p. 678-684, 2010.
- [16] Orilogi, E.: *Evaluating Volumetric Strain as a Predictor of Yield and Peak Strength for the Multistage Triaxial Test: A Case Study with Utah Coal Specimens*, in *Geological Engineering*. Montana Tech, 2019.
- [17] Pagoulatos, A.: *Evaluation of multistage triaxial testing on Berea sandstone*. 2004.
- [18] Crawford, A.M. and Wylie, D.A.: *A Modified Multiple Failure State Triaxial Testing Method*, in *The 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 1987.
- [19] Aghababaei, M., Behnia, M. and Moradian, O.: *Experimental investigation on strength and failure behavior of carbonate rocks under multistage triaxial compression*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 123: p. 104099, 2019.
- [20] Banerjee, A., Puppala, A.J. and Hoyos, L.R.: *Suction-controlled multistage triaxial testing on clayey silty soil*. Engineering geology, 265: p. 105409, 2020.
- [21] Li, Y. et al. *Mechanical properties of intact rock and fractures in welded tuff from Newberry Volcano*, in *Proceedings of 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA*. 2012.