



Johannes Scheriau, BSc

Vergleich von natürlichen und wiederhergestellten Schluff-Böden

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Dipl.-Ing. BSc Michael Havinga

Institut für

Bodenmechanik und Grundbau

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Dipl.-Ing. BSc Michael Havinga für die Betreuung und die gute Zusammenarbeit während der gesamten Masterarbeit. Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte für die interessante Vorlesung der Geotechnik GL im Bachelorstudium, ohne die es mich wahrscheinlich nie in das Fachgebiet der Geotechnik verschlagen hätte. Des Weiteren bedanke ich mich beim Team des Geotechnischen Labors der TU Graz für die Unterstützung bei der Durchführung der unzähligen Versuche.

Der größte Dank gilt aber meiner Familie, die mich über die gesamte Studienzeit in jeglicher Hinsicht unterstützt hat. Vor allem ohne die großzügige finanzielle Unterstützung wäre das Studium in dieser Form nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Das Kernthema dieser Arbeit war, einen Versuchs- und Verfahrensablauf für die künstliche Herstellung von Schluff-Böden zu erarbeiten. Dadurch, dass Bodenproben meist nicht ungestört ins Labor gebracht werden können, wird nach einer Methode geforscht um die Bodenproben künstlich herzustellen. Um die Proben untereinander vergleichen zu können, wurden Oedometerversuche an wiederhergestellten und natürlichen Proben durchgeführt und einander gegenübergestellt.

Zur Wiederherstellung von Bodenproben aus Schluff-Böden wurden Materialien aus drei verschiedenen Regionen Österreichs verwendet. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften und Körnungslinien der verschiedenen Proben war es nicht möglich, jedes Material bei der Wiederherstellung gleich zu behandeln. Die Methode welche zur Wiederherstellung solcher Proben zur Anwendung kam, wird als „Slurry Deposition Method“ bezeichnet. Eine Probe wird wiederhergestellt, indem sie zuerst mit Wasser vermischt, dann vorkonsolidiert und schlussendlich mittels eines Oedometerversuchs getestet wird. Der Verfahrensablauf zur Wiederherstellung ist immer gleich, muss aber bei Wassergehalt und Vorkonsolidierungsspannung individuell an das Probenmaterial angepasst werden. Die Tiefe aus der das Probenmaterial ursprünglich stammt, spielt dabei für die Vorkonsolidierungsspannung eine große Rolle und darf nicht vernachlässigt werden. Zusätzlich zu den wiederhergestellten Proben wurden auch natürliche Proben getestet.

Durch aus den Oedometerversuchen erhaltene Kompressionskurven und Steifemodule, sowie sonstige Bodenparameter, die durch bodenmechanische Untersuchungen des Probenmaterials herausgefunden wurden, konnten natürliche und wiederhergestellte Proben gut miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse und der Vergleich der Porenzahl e , sind, obwohl sehr wenige Proben wiederhergestellt wurden, für weitere Versuche vielversprechend. Die Korngrößenverteilung der einzelnen Proben zeigt, dass es in der Phase der Vorkonsolidierung, zu nahezu keinem Absetzverhalten der schwereren Bodenteilchen kommt.

Abstract

The main aim of this thesis was to develop a sequence of tests and processes for the artificial reconstitution of silt grounds. In order to enable comparisons between samples, oedometric tests on reconstituted and natural samples were necessary.

For the reconstitution of soil samples from silt grounds, materials from three different Austrian regions were used. Due to the varying characteristics and grain-size curves of the samples, it was not possible to treat the materials equally during the process of reconstituting. The method that was used for reconstituting the samples was the so-called "Slurry Deposition Method". Samples are mixed with water, preconsolidated and finally tested with the help of an oedometric test. Even though the sequence of processes is always the same, adjustments have to be made in accordance with the specific water content and preconsolidation tension of the individual sample. Further, the depth from which the sample material was extracted plays a crucial role in determining the preconsolidation tension and must thus not be neglected. In addition to the reconstituted samples, also natural samples were tested.

With the help of the compression curves and constrained moduli obtained from the oedometric tests as well as the ground parameters revealed in the course of soil mechanical examinations, natural and reconstituted samples could easily be compared. Notwithstanding the small amount of recovered samples, the results and comparison of the void ratio e are highly promising. The grain size distribution of individual samples shows that during the phase of preconsolidation, hardly any settling behavior of heavy grains occurs.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Allgemeiner Teil	2
2.1	Feinkörnige Böden	2
2.1.1	Geologische Entstehung	2
2.1.2	Ort der Probenentnahmen.....	4
2.1.3	Bodenklassifikation nach ÖNORM B 4400-1	6
2.2	Konsolidierungstheorie nach Terzaghi	6
2.3	Oedometerversuch nach ÖNORM EN ISO 17892-5.....	7
2.3.1	Herstellen der Probekörper	7
2.3.2	Messungen	8
2.3.3	Vorbereitung des Versuchsgeräts	8
2.3.4	Belastung.....	8
2.4	Verfahren zur künstlichen Herstellung von Sedimenten	10
2.4.1	Slurry Deposition Methode	11
2.4.2	In-Place Wet Pluviation Methode	16
3	Probenherstellung	20
3.1	Allgemeine Literatur	20
3.2	Versuchseinrichtung.....	21
3.3	Herstellungsablauf	24
4	Ergebnisse	36
4.1	Oedometer	36
4.1.1	Kompressionskurven St. Kanzian.....	36
4.1.2	Kompressionskurven von Ginau.....	43
4.1.3	Kompressionskurven Salzburg/Riedenburg.....	50
4.2	Querschnittsbilder	57
4.3	Korngrößenverteilungen.....	59
4.4	Laborergebnisse aus St. Kanzian.....	61
4.4.1	Bodenparameter	61

4.4.2	Triaxialversuch.....	62
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	63
6	Literatur.....	64
7	Internetverzeichnis.....	65

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	REM - Aufnahme von blättrigem, pseudohexagonalem Kaolinit (Wikipedia, 2015)	3
Abb. 2	Luftaufnahme von St. Kanzian am Klopeinersee (Google Maps, 2015)	4
Abb. 3	Luftaufnahme von Ginau (Google Maps, 2015)	5
Abb. 4	Luftbild Salzburg Stadt, westlich vom Mönchsberg (Google Earth, 2015)	5
Abb. 5	Systemskizze Oedometerzelle	9
Abb. 6	Getrocknete Slurry Deposition Probe (Donahue 2007)	12
Abb. 7	Versuchsapparatur zur Konsolidierung (Donahue 2007)	15
Abb. 8	Getrocknete In-Place Wet Pluviation Probe (Donahue 2007)	17
Abb. 9	In-Place Wet Pluviation Proben zu verschiedenen Zeitpunkten (Donahue 2007)	19
Abb. 10	Mischapparatur mit Vakuumentlüftung	21
Abb. 11	Vakuumpumpe der Firma KNF - Neuberger (2015)	22
Abb. 12	3D gedruckter Schalungszylinder	23
Abb. 13	Systemskizze Oedometerzelle mit Kunststoffzylinderaufsatz	23
Abb. 14	Bohrkern aus St. Kanzian (Kärnten)	24
Abb. 15	Links: Stechzylinder leer; Rechts: Ausgestochene Probe	25
Abb. 16	Eingussform für das Probenmaterial	27
Abb. 17	Links: Filterstein mit Schraube + 250 g ; Rechts: Filterstein + 1000 g	28
Abb. 18	Links: Filtergewicht + 1000 g ; Rechts: Filtergewicht + 2500 g	28
Abb. 19	Druckluftkonsolidierung in der Oedometerzelle	29
Abb. 20	Links: Probe nach der Vorkonsolidierung; Rechts: Zylinder entfernt	31
Abb. 21	Probe mit und ohne äußeren Oedometerring	32
Abb. 22	Fertige Oedometerprobe	33
Abb. 23	Einbau der Probe zum Oedometersuch	33
Abb. 24	Oedomterprobe vor der Trocknung	34
Abb. 25	Halbierung der Probe für die Korngrößenverteilung	35
Abb. 26	Kompressionskurven von STK.NP.2, STK.SD.2, STK.SD.7	36
Abb. 27	Kompressionskurven von STK.SD.4 und STK.SD.4-2	38
Abb. 28	Kompressionskurven von STK.SD.5 und STK.SD.5-2	40
Abb. 29	Kompressionskurven von STK.SD.8 und STK.SD.8-2	41
Abb. 30	Kompressionskurven von GN.NP.1, GN.SD.1 und GN.SD.1-2	43
Abb. 31	Kompressionskurven von GN.NP.2, GN.SD.2 und GN.SD.2-2	45
Abb. 32	Kompressionskurven von GN.NP.3, GN.SD.3 und GN.SD.3-2	47
Abb. 33	Kompressionskurven der natürlichen Proben aus Ginau	49

Abb. 34	Kompressionskurven der künstlich wiederhergestellten Proben aus Ginau	.49
Abb. 35	Kompressionskurven von DN.NP.1, DN.SD.1 und DN.SD.1-2	.....50
Abb. 36	Kompressionskurven von DN.NP.2, DN.SD.2 und DN.SD.2-2	.....52
Abb. 37	Kompressionskurven von DN.NP.3, DN.SD.3 und DN.SD.3-2	.....54
Abb. 38	Kompressionskurven der natürlichen Proben aus Salzburg/Riedenburg	.....56
Abb. 39	Kompressionskurven der künstlichen Proben aus Salzburg/Riedenburg	.....56
Abb. 40	Querschnittsbild aus St.Kanzian, Oben: natürlich, Unten: künstlich	.....57
Abb. 41	Querschnittsbild aus Ginau von zwei künstlichen Proben	.....58
Abb. 42	Querschnittsbild aus Salzburg/Riedenburg, Oben: natürlich, Unten: künstlich	.....58
Abb. 43	Korngrößenverteilung Oben-Unten aus St. Kanzian	.....59
Abb. 44	Korngrößenverteilung Oben-Unten aus Ginau	.....59
Abb. 45	Korngrößenverteilung Oben-Unten aus Salzburg/Riedenburg	.....60
Abb. 46	Korngrößenverteilung von St. Kania, Ginau und Salzburg/Riedenburg	.....60
Abb. 47	Untersuchungsergebnisse St.Kanzian	.....61
Abb. 48	Ergebnis Triaxialversuch St. Kanzian	.....62
Abb. 49	Ergebnis Triaxialversuch St. Kanzian	.....62

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Bezeichnung von Bodenarten nach ÖNORM B 4400-1	6
Tab. 2	Belastungsfolge im Oedometerversuch	9
Tab. 3	Wassergehälter für den Mischvorgang	26
Tab. 4	Konsolidierungsablauf mit Gewichten.....	29
Tab. 5	Konsolidierungsablauf mit Druckluft.....	30
Tab. 6	Steifemodule aus Oedometer von STK.NP.2, STK.SD.2, STK.SD.7	37
Tab. 7	Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, Tiefe 3,80 – 4,00 m	37
Tab. 8	Steifemodule aus Oedometer von STK.SD.4 und STK.SD.4-2	39
Tab. 9	Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, Tiefe 4,68 – 4,77 m	39
Tab. 10	Steifemodule aus Oedometer von STK.SD.5 und STK.SD.5-2	41
Tab. 11	Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, 1. Probenserie Tiefe 5,00 – 5,20 m	41
Tab. 12	Steifemodule aus Oedometer von STK.SD.8 und STK.SD.8-2	42
Tab. 13	Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, 2. Probenserie Tiefe 5,00 – 5,20 m	42
Tab. 14	Steifemodule aus Oedometer von GN.NP.1, GN.SD.1 und GN.SD.1-2	44
Tab. 15	Ergebnisse der Bodenparameter Ginau, 1. Probenserie, Tiefe 0,50 m	44
Tab. 16	Steifemodule aus Oedometer von GN.NP.2, GN.SD.2 und GN.SD.2-2	46
Tab. 17	Ergebnisse der Bodenparameter Ginau, 2. Probenserie, Tiefe 0,50 m	46
Tab. 18	Steifemodule aus Oedometer von GN.NP.3, GN.SD.3 und GN.SD.3-2	48
Tab. 19	Ergebnisse der Bodenparameter Ginau, 3. Probenserie, Tiefe 0,50 m	48
Tab. 20	Steifemodule aus Oedometer von DN.NP.1, DN.SD.1 und DN.SD.1-2	51
Tab. 21	Ergebnisse der Bodenparameter, 1. Probenserie, Tiefe 8,60 – 9,00 m	51
Tab. 22	Steifemodule aus Oedometer von DN.NP.2, DN.SD.2 und DN.SD.2-2	53
Tab. 23	Ergebnisse der Bodenparameter, 2. Probenserie, Tiefe 8,60 – 9,00 m	53
Tab. 24	Steifemodule aus Oedometer von DN.NP.3, DN.SD.3 und DN.SD.3-2	55
Tab. 25	Ergebnisse der Bodenparameter, 3. Probenserie, Tiefe 8,60 – 9,00 m	55

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

E_{oed}	[kN/m ²]	Steifemodul aus dem Oedometer
S_r	[%]	Sättigungsgrad
U_m	[%]	mittlerer Konsolidierungsgrad

Kleine Buchstaben

d	[mm]	Durchmesser
e	[-]	Porenzahl
Δh	[mm]	Differenzhöhe
h_0	[mm]	Ausgangshöhe
m_d	[g]	Masse der getrockneten Probe
m_F	[g]	Masse der feuchten Probe
m_w	[g]	Masse Wasser
n	[%]	Porenanteil
w_L	[%]	Wassergehalt der Fließgrenze

Griechische Buchstaben

φ	[°]	innerer Reibungswinkel des Bodens
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_F	[g/cm ³]	Feuchtdichte
σ	[kN/m ²]	Normalspannung

Abkürzungen

ca.	zirka
i.A.	im Allgemeinen
NP	Natürliche Probe
REM	Rasterelektronenmikroskop
SD	Slurry Deposition Probe
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Im Zuge dieser Masterarbeit wird auf die künstliche Herstellung von feinkörnigen, lakustrinen Sedimenten eingegangen. Dabei liegt der Fokus zunächst auf den Beschreibungen der allgemein bekannten Verfahren und das dazu benötigte Hintergrundwissen über die Geologie und die Klassifizierung dieser Sedimente. Des Weiteren werden allgemeine Themenbereiche zur Konsolidierungstheorie und zum Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung behandelt.

Der praktische Teil der Arbeit wurde im Labor für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz durchgeführt. Mit Probenmaterial aus verschiedenen Regionen Österreichs werden Oedometer-versuche durchgeführt. Diese Proben werden im Weiteren künstlich aufbereitet, konsolidiert und ein weiterer Oedometerversuch wird durchgeführt.

Jede Probe durchläuft eine Serie von Oedometerversuchen (natürlich, wiederhergestellt) und die Ergebnisse werden verglichen. Danach werden diese Versuche wiederholt, um zu überprüfen, ob die Ergebnisse vergleichbar sind. Dabei liegt das Augenmerk auf dem Vergleich der Dichte ρ , Porenzahl e und Porenanteil n zwischen natürlichen und künstlichen Proben. Es wird eine Versuchsanleitung erarbeitet, die es ermöglicht Proben gleicher Eigenschaften immer wieder herzustellen.

2 Allgemeiner Teil

2.1 Feinkörnige Böden

2.1.1 Geologische Entstehung

Feinkörnige Sedimente entstehen durch chemische und physikalische Verwitterung der Gesteine und dem Transport durch Eis, Wasser, Wind und Schwerkraft. Sie werden ausgewaschen oder abgetragen und an anderen, meist tiefer liegenden Orten (Seen, Täler oder Meere) abgelagert. Es bilden sich unverfestigte Sedimente. Die Entstehung von Sedimenten ist ein Kreislauf aus einzelnen Prozessen, der sich erdgeschichtlich wiederholt (Verwitterung – Abtragung – Transport – Ablagerung – Verfestigung) eventuell neuerliche Abtragung durch Tektonik und Gebirgsbildung. Im Laufe der Erdgeschichte verändert sich diese Prozessabfolge z.B. durch Klimaveränderungen oder Vergletscherungen. Je größer das geologische Alter solcher Sedimente ist umso höher ist i. A. ihre Verkittung bzw. Verfestigung. Durch den Prozess der Diagenese bzw. der Metamorphose werden aus locker gelagerten Sedimenten verfestigte Sedimentite. Quartäre Sedimente sind vorwiegend unverfestigt (Lockergestein). Diese Art der Sedimente lässt sich auch durch das bzw. die Transportmittel kennzeichnen z.B. Eis – glazigen oder Wind - äolisch. Aufgrund des Ortes der Ablagerung kann zwischen vier Arten unterschieden werden (Scheffer et al. 2010):

- Festland: terrestrisch
- Fließgewässer: fluvial
- Süßwassersee: lakustrin
- Meer: marin

Im Fall von feinkörnigen Sedimenten, wie Schluffe und Tone, handelt es sich oft um lakustrine Stillwassersedimente (geringe Strömung) die sich in Seen abgelagert haben.

- **Postglaziale lakustrine Feinsedimente**

Diese feinkörnigen und i. A. locker gelagerten bzw. sehr weiche bis weiche Sedimente sind während und nach der letzten quartären Eiszeit, nach dem Rückzug der Gletscher vor ca. 10.000 bis 15.000 Jahren entstanden. Während der letzten Eiszeit waren die Alpen in Österreich zum größten Teil stark vergletschert. Durch die Bewegung der Gletscher wurden Täler ausgeschliffen und eingetieft, und die entstandenen Sedimente mit dem Schmelzwasser des Gletschers abtransportiert. Durch das Abschmelzen der Gletscher entstanden im ehemaligen Gletscherbereich Seebecken, im Gletschervorfeld

(Periglazialgebiet) hingegen Flussterrassen. Das während der Eiszeit gebildete Moränenmaterial enthält meist schlecht sortiertes Material einer weitgestuften Körnungslinie (von Ton über Schluff, Sand Kies, Stein bis zu Blockmaterial). Die Gletscherende wurden oft von sand-kies-dominierten Endmoränen markiert, deren schotterähnlichen Sedimente meist etwas besser sortiert waren als die der Grundmoräne, weil das erodierte Feinmaterial bereits während des Abschmelzens ausgewaschen wurde. Die fluvioglazigenen Kiese der Flussterrassen die im Gletschervorfeld entstanden sind, wie auch Beckenschluffe und -tone aus den abflusslosen Becken, sind besser sortiert als das Moränenmaterial (Scheffer et al. 2010).

Im Frühjahr und Sommer setzen sich helle, grobkörnige und sandreiche Sedimente ab, da das Wasserangebot durch große Mengen an Schmelzwässern von Gletschern oder der Schneeschmelze hoch ist. Im Winter werden vor allem dunkle, humose Tone abgelagert. Dadurch ergeben sich, abhängig von den Niederschlägen und Temperaturen, unterschiedlich mächtige und verschieden gefärbte schichtförmige Ablagerungen.

- **Schluffe (Silte) und Tone (Pelite)**

In schluffigen Böden dominiert die Kornfraktion von 0,063 bis 0,002 mm. Das weltweit verbreitetste und bodenkundlich sehr bedeutende Schluffsediment ist der Löss. Schluffreiche Sedimente können auch in Seen bei hoher Sedimentzufuhr entstehen.

Bei Tönen sind hohe Gehalte der Kornfraktion $<0,002$ mm enthalten. Darin überwiegen die meist blättchenförmigen Tonminerale, die dem Ton seine Plastizität verleihen. Schluffsedimente hingegen sind nicht bzw. nur gering plastisch. Tone entstehen meist unter sehr ruhigen Sedimentationsbedingungen und bei geringer Transportkraft des Wassers. Im Prozess der Diagenese bei Tönen und Schluffen wird das Wasser aus den Porenräumen ausgepresst und dabei werden die blättchenförmigen Tonteilchen parallel und dicht zueinander gelagert. Die Plastizität des Tones geht dabei mehr und mehr verloren (Scheffer et al. 2010).

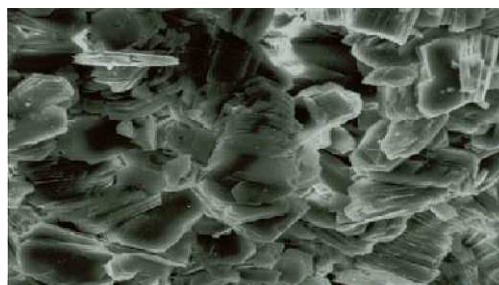


Abb. 1 REM - Aufnahme von blättrigem, pseudo-hexagonalem Kaolinit (Wikipedia, 2015)

2.1.2 Ort der Probenentnahmen

Zur künstlichen Wiederherstellung von Sedimenten, wurden Bodenproben aus drei verschiedenen Regionen Österreichs entnommen.

- **St. Kanzian – Kärnten**

Im Zuge des Großprojektes der Koralmbahn zwischen Kärnten und Steiermark, wird in der Region von St. Kanzian am Klopeinersee im Bezirk Völkermarkt eine Tunnelkette errichtet. Durch diese Baumaßnahmen war es möglich Probenmaterial aus den dortigen Böden zu entnehmen. Das Probenmaterial stand in Form einer Kernbohrung zur Verfügung. Da diese Region durch die letzte Eiszeit geprägt wurde, eignen sich diese Böden ideal, um im Zuge dieser Masterarbeit Proben künstlich wiederherzustellen und zu untersuchen.

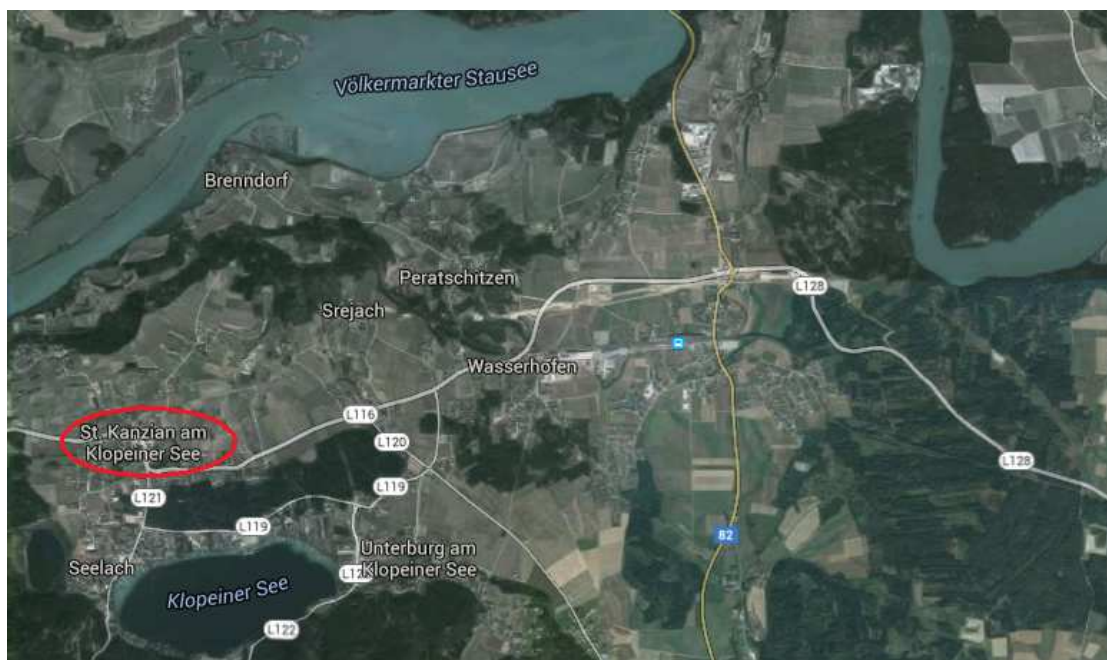


Abb. 2 Luftaufnahme von St. Kanzian am Klopeinersee (Google Maps, 2015)

- **Ginau – Salzburg**

In Ginau, im Bezirk St. Johann im Pongau in der Nähe von Wagrain, wurden Untersuchungen an einem Rutschhang durchgeführt. Bei einem Lokalaugenschein ist aufgefallen, dass am gegenüberliegenden Hang eine Schicht aus feinkörnigem Sediment an der Erdoberfläche ansteht, welches entstellungsgeschichtlich ebenfalls einer postglazialen lakustrinen Seeablagerung zuzuordnen ist. Es wurden dort Stechzylinderproben entnommen.

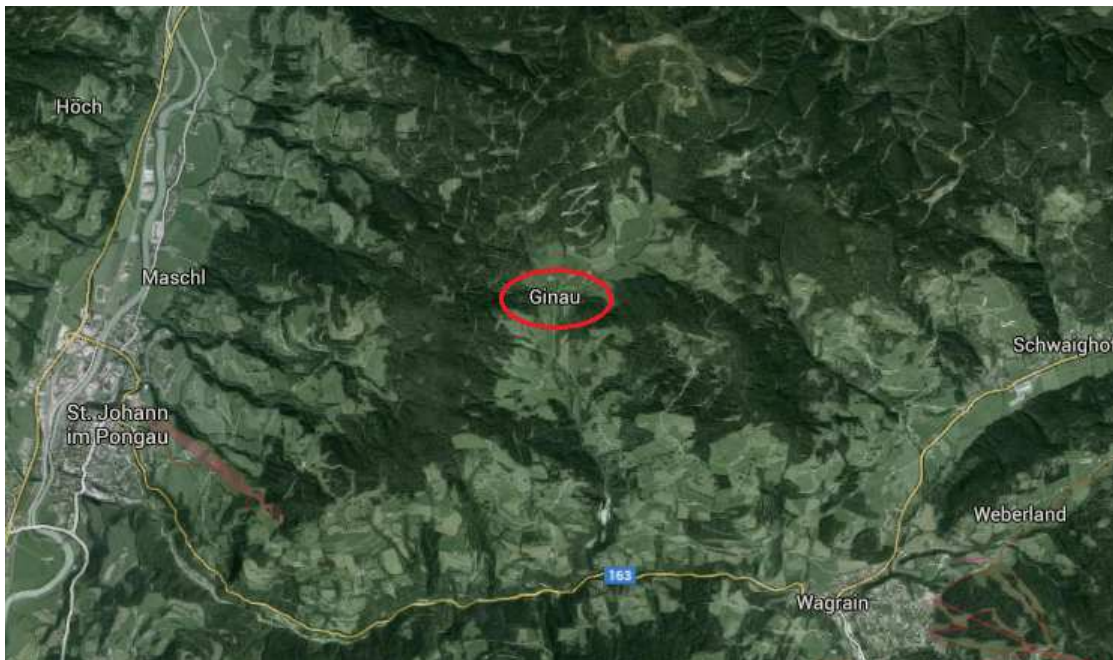


Abb. 3 Luftaufnahme von Ginau (Google Maps, 2015)

- **Salzburg, Stadtteil Riedenburg**

In der Stadt Salzburg wurden im Westen vom Mönchsberg im Stadtteil Riedenburg Proben entnommen. Die Böden, die dort zu finden sind, werden umgangssprachlich als „Salzburger Seeton“ bezeichnet und stellen in bodenmechanischer Betrachtung oftmals eine große Herausforderung bei der Sicherung von Baugruben und der Gründung von Gebäuden dar.

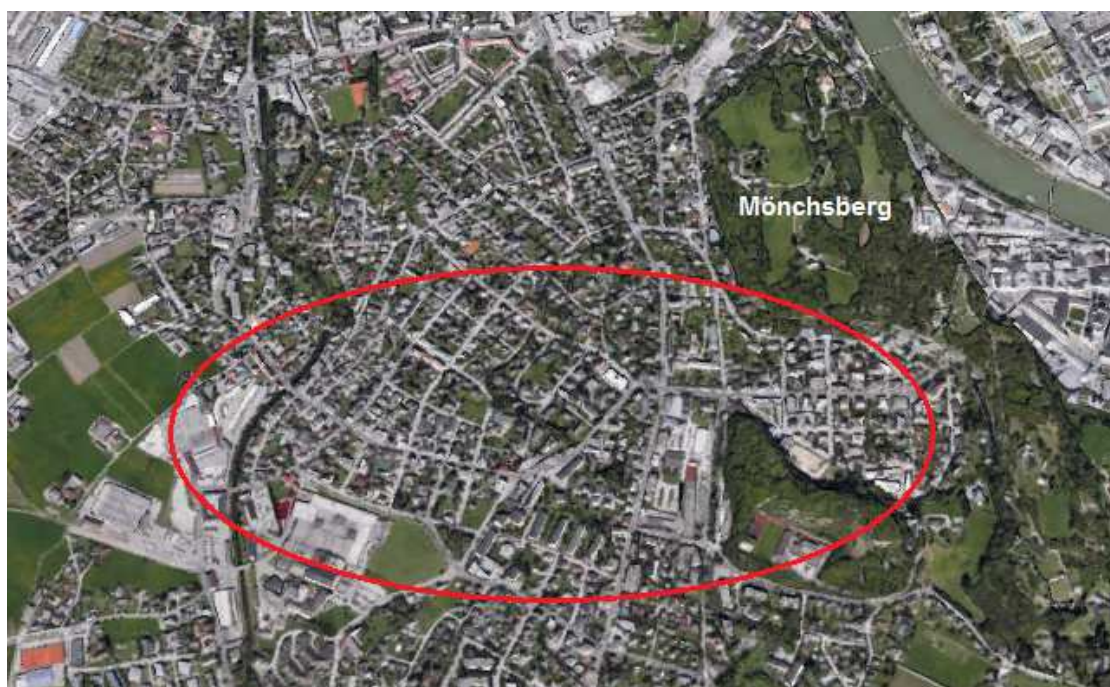


Abb. 4 Luftbild Salzburg Stadt, westlich vom Mönchsberg (Google Earth, 2015)

2.1.3 Bodenklassifikation nach ÖNORM B 4400-1

In der ÖNORM B 4400-1 (2010) wird die Benennung, Beschreibung und Klassifizierung der unterschiedlichen Böden geregelt. Die Klassifizierung geht von großen Blöcken bis Ton, von Korngröße über 630 mm bis <0,002 mm. Für die Klassifizierung der unterschiedlichen Böden, die hier zur Herstellung künstlicher Sedimente verwendet werden, ist nur ein Auszug der gesamten Bodenbezeichnungen nötig. In Tab. 1 sind die Bezeichnungen, Kurzzeichen und Korngrößenbereiche für Sand, Schluff und Ton mit all ihren Unterteilungen angeführt.

Tab. 1 Bezeichnung von Bodenarten nach ÖNORM B 4400-1

Bezeichnung	Kurzzeichen	Korngrößenbereich
Sand	Sa	über 0,063 mm bis 2 mm
Grobsand	CSa	über 0,63 mm bis 2 mm
Mittelsand	MSa	über 0,2 mm bis 0,63 mm
Feinsand	FSa	über 0,063 mm bis 0,2 mm
sandig	sa	
grobsandig	csa	
mittelsandig	msa	
feinsandig	fsa	
Schluff	Si	über 0,002 mm bis 0,063 mm
Grobschluff	CSi	über 0,02 mm bis 0,063 mm
Mittelschluff	MSi	über 0,0063 mm bis 0,02 mm
Feinschluff	FSi	über 0,002 mm bis 0,0063 mm
schluffig	si	
grobschluffig	csi	
mittelschluffig	msi	
feinschluffig	fsi	
Ton	Cl	bis 0,002 mm
tonig	cl	

Natürliche Bodenarten sind meistens Vermengungen aus verschiedenen Korngrößenbereichen, wie z.B. Schluff-Sand-Gemische. Die Bezeichnung von zusammengesetzten Bodenarten ist in der ÖNORM B4400-1 Kapitel 3.5 geregelt.

2.2 Konsolidierungstheorie nach Terzaghi

Konsolidierung bezeichnet in der Bodenmechanik die zeitlich verzögerte Verdichtung des Bodens infolge einer Lasterhöhung. Die Verdichtung von Böden erfolgt im Wesentlichen durch Zusammendrücken der Poren. Sind die Poren mit Wasser gefüllt, kann aufgrund der Inkompressibilität des Wassers eine Verdichtung nur durch

Auspressen von Porenwasser erreicht werden. Ist die Wasserbewegung aufgrund geringer Durchlässigkeit und langer Entwässerungspfade behindert, wird die Lasterhöhung zunächst nur vom Porenwasser aufgenommen - es entsteht ein Porenwasserüberdruck. Mit Abfließen des Porenwassers und dem Abbau des Porenwasserüberdrucks, wird dies allmählich auf das Korngerüst übertragen, welches sich hierdurch verdichtet. Nach Terzaghi (1961) kann die Theorie mit einem eindimensionalen mechanischen Modell erklärt werden. Folgende Annahmen müssen dafür getroffen werden:

- Volle Sättigung des Bodens
- Wasser und Bodenbestandteile sind inkompressibel
- Strömung im Boden wird durch Gesetz von Darcy beschrieben
- Durchlässigkeit k ist konstant
- Hook'sches Gesetz – Steifemodul E_s ist konstant
- Plötzliche Lastaufbringung
- Belastete Bodenschicht ist seitlich eingeschlossen, es gibt keine seitliche Dehnung und keine seitliche Wasserabgabe

Die Differentialgleichungen und Formeln um Setzungen nach der Konsolidierungstheorie nach Terzaghi (1961) zu rechnen, können in der Literatur nachgelesen werden.

2.3 Oedometerversuch nach ÖNORM EN ISO 17892-5

In der ÖNORM EN ISO 17892-5 (2014) kann genaueres über einen Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung nachgelesen werden. In dieser Arbeit wird ein Ablauf des Versuches beschrieben, der der Norm entspricht, und sowohl im Labor für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz so durchgeführt wird, als auch für die Untersuchung der natürlichen und künstlich wiederhergestellten Proben verwendet wurde. Zusätzlich zu den manuellen Oedometern die in dieser Norm beschrieben werden, wurden auch automatische Oedometer verwendet. Diese unterscheiden sich dadurch, dass die pneumatische Belastungserhöhung über einen PC gesteuert wird, und die Belastungen exakter als beim manuellen Oedometer sind. Die gesamten Messdaten werden digital erfasst und gespeichert.

2.3.1 Herstellen der Probekörper

Bei der Herstellung der Probekörper handelt es sich in der folgenden Beschreibung um natürliche Proben oder künstliche Proben nach der Vorkonsolidierungsphase. Eine

Probe kann auf unterschiedlichste Weise, vor Ort entnommen werden, wobei sich die Entnahmeart nach dem Boden, den Grundwasserverhältnissen und der Zugänglichkeit richtet. Die Bodenprobe wird auf die Dimension des Oedometerringes ($d = 80 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$) zugeschnitten bzw. können je nach Größe der Probe auch mehrere Proben herausgeschnitten werden. Beim Zuschneiden wird die Probe auf eine Ausstechvorrichtung gesetzt, dabei wird ein Ausstechring kontinuierlich in die Probe gedrückt, bis dieser mit Boden gefüllt ist und ein Teil über den oberen Rand des Rings hinausragt. Alle überstehenden und abgeschnittenen Bodenteile müssen entfernt werden. Mit den Abschnitten wird eine Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung nach ÖNORM EN ISO 17892-1 (2014) durchgeführt. Der Wassergehalt der Probe ermöglicht die Berechnung der Porenzahl e , während der Versuch noch durchgeführt wird.

2.3.2 Messungen

Unmittelbar nach dem Zuschneiden ist die Masse des Rings mit Boden zu bestimmen. Die Tara des Rings muss vorher bestimmt werden. Die Masse der Probe kann nach der Wiegung mit einer Genauigkeit von $0,01 \text{ g}$ errechnet werden. Laut Norm kann angenommen werden, dass Durchmesser, Höhe und Volumen des Probekörpers den Abmessungen des Rings entsprechen. Unmittelbar nach der Herstellung der Probe sollte mit dem Versuch begonnen werden. Sollte dies nicht möglich sein, muss der Probekörper durch eine Plastikfolie oder ähnliches gegen Austrocknung geschützt werden.

2.3.3 Vorbereitung des Versuchsgeräts

Der Oedometerring wird in die Versuchszelle eingebaut, der Druckstempel auf die Probe gesetzt. Danach wird die Druckkappe mit Membran und Verformungsaufnehmer, der einen Mindestweg von 10 mm haben muss, auf den Druckstempel gesetzt und horizontal ausgerichtet. Der Verformungsaufnehmer wird auf Null gestellt und die Versuchszelle kann mit Wasser gefüllt werden.

2.3.4 Belastung

Die ÖNORM EN ISO 17892-5 (2014) gibt eine Empfehlung für die Belastungsfolge in Kapitel 6.5.1.4 an, die in den meisten Fällen nur mit speziellen Geräten aufgebracht werden kann. Die Belastungsfolge die im Labor für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz verwendet wird, lautet wie folgt:

Tab. 2 Belastungsfolge im Oedometerversuch

Erstbelastung [kPa]	Entlastung [kPa]	Zweitbelastung [kPa]
10	80	40
20	20	80
40		160
80		320
160		640
320		

Die Belastungsdauer der Belastungsstufen sollte immer die gleiche sein, z.B. 24 Stunden für sehr feinkörnige Bodenproben. Durch die spezifischen Setzungen Δh bezogen auf die Ursprungsprobenhöhe h_0 kann bei jeder Belastungsstufe ein Steifemodul errechnet werden.

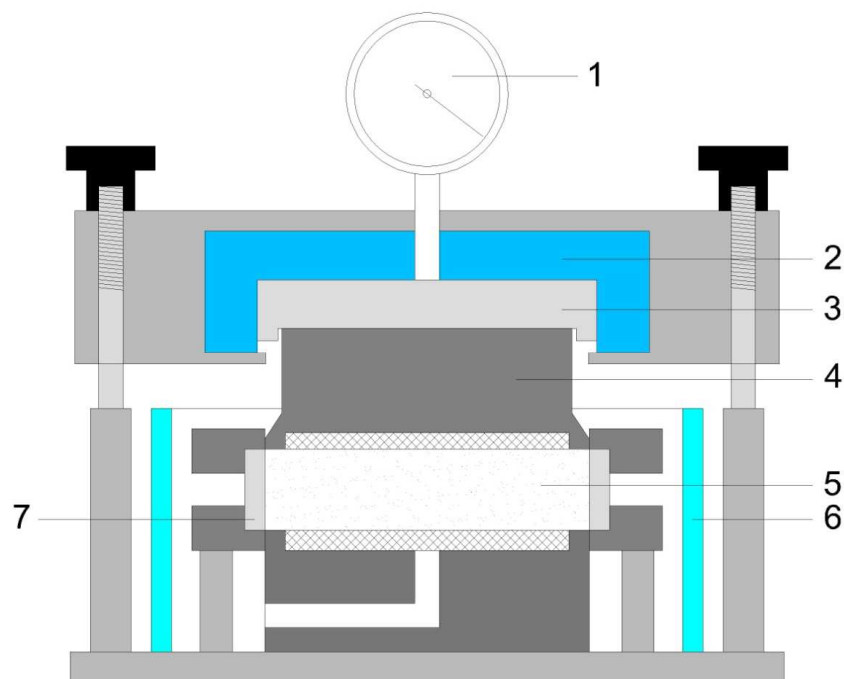


Abb. 5 Systemskizze Oedometerzelle

- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1 Verformungsaufnehmer | 2 Druckluftmembran |
| 3 Druckplatte | 4 Druckstempel |
| 5 Bodenprobe | 6 Plexiglasumrandung |
| 7 Oedometerring | |

2.4 Verfahren zur künstlichen Herstellung von Sedimenten

In der Literatur gibt es eine Hand voll Verfahren, nach denen es möglich ist, eine künstliche Bodenprobe herzustellen. Diese Verfahren sind

- Moist Tamping
- Water Pluviation
- Air Pluviation
- In-Place Wet Pluviation Methode
- Slurry-Deposition Methode

Die Slurry Deposition Methode und die In-Place Wet Pluviation Methode werden in den Kapiteln 2.4.1 und 2.4.2 detailliert erklärt, die drei weiteren Verfahren werden folgend beschrieben.

- **Moist Tamping**

Das ist die älteste Technik zur Wiederherstellung von natürlichen Proben. Diese Technik besteht darin, hintereinander mehrere Schichten einer feuchten Masse in einen formgebenden Zylinder zu gießen. Die einzelnen Schichten werden mit einer bestimmten Kraft und Frequenz platt gestampft, bevor die nächste Schicht eingegossen wird, Kuerbis et al. (1988). Mit der Moist Tamping Methode werden sehr lockere bis dichte, teilgesättigte Proben hergestellt, die eine sehr gering homogene Struktur aufweisen. Daher wird Moist Tamping in den seltensten Fällen bei Studien oder Forschungsversuchen verwendet.

- **Wet Pluviation**

Bei dieser Methode wird das Probenmaterial zu einer dünnen, schlammigen Flüssigkeit aufgemischt und in einen Zylinder, der halb voll mit Wasser ist, gegossen. Die Bodenteilchen können nahezu natürlich sedimentieren. Wenn es sich um einen schluffigen Boden handelt, bei dem keine gröbere Körnung als Feinsand vorhanden ist. Dadurch wird eine nahezu homogene Probe hergestellt. Auch die Herstellung einer geschichteten Probe ist möglich. Anschließend wird die Probe konsolidiert und kann dann für verschiedene bodenmechanische Versuche verwendet werden.

- **Dry Pluviation**

Die Dry Pluviation ist grundsätzlich gleich wie die Wet Pluviation. Der Unterschied besteht darin, dass hier getrocknetes Probenmaterial in einen halbvoll mit Wasser gefüllten Zylinder gegossen wird. Die weitere Vorgangsweise ist gleich wie bei der Wet

Pluviation. Wegen der Verwendung von getrocknetem Material, ist diese Methode nur bei sandigen Böden sinnvoll, da es bei feineren Körnungen zu Verklumpung der Bodenteilchen beim Eingießen kommen kann.

2.4.1 Slurry Deposition Methode

Der erste und wichtigste Aspekt der Slurry-Deposition Methode ist es, Proben wiederherzustellen, welche die bedeutend immanente Veränderlichkeit, die in der Natur vorzufinden ist, auf ein Minimum reduzieren. Solche Proben können dann in einer systematischen und kontrollierten Art und Weise geprüft werden, um spezifische Verflüssigungseigenschaften bewerten zu können.

Bis jetzt sind die meisten wiederhergestellten Proben mit Sand und schluffigem Sand durchgeführt worden. Die heute übliche Methode wurde von Kuerbis et al. (1988) entwickelt. Das Hauptmerkmal dieser Methode ist, dass Boden und entlüftetes Wasser, vermischt zu einem dicken Brei, direkt in einen sich ständig drehenden Mischbehälter gegossen werden, der nur zum Entlüften angehalten wird, um eine sorgfältige Durchmischung zu erhalten.

Wenn man diese Methode an einem schluffigen Boden anwendet, ist es beinahe unmöglich, eine homogene Probe zu erhalten. Aufgrund der reduzierten Durchlässigkeit der dicken Flüssigkeit ist die Bewegung des Wassers und der Feinteile während des Mischvorganges eingeschränkt. Daher ist es sehr schwer, eine gute Durchmischung zu erhalten. Um eine homogene Probe zu erreichen, muss während des Mischvorganges beträchtlich mehr Wasser hinzugegeben werden. An diesem Punkt wird diese Art der Methode kritisch, denn sobald das Mischen gestoppt wird, beginnen sich die schwereren Partikel aufgrund der Gravitation abzusetzen.

Der Wassergehalt sollte so gewählt werden, dass die Konsistenz des aufgemischten Bodens weder zu dick noch zu dünn ist. Die dickflüssige, breiige Masse sollte sich leicht verarbeiten lassen. Im Regelfall liegt der Wassergehalt w bei Sand dominierten Bodenproben bei ungefähr 45 %. Er sollte beim Mischvorgang an den vorhandenen Boden angepasst werden. Ein guter Anhaltspunkt ist der doppelte Wassergehalt der Fließgrenze w_L .

Beim Mischvorgang muss entlüftetes und wenn möglich destilliertes Wasser verwendet werden. Während des Vorganges sollte im Idealfall ein ständiges Vakuum im Mischbehälter herrschen. Es muss verhindert werden, dass weitere Luft in den Boden

eingemischt wird. Das Mischen darf nicht so energisch sein, dass dadurch die Kornverteilung verändert wird, sprich dass größere Teilchen zerschlagen werden.



Abb. 6 Getrocknete Slurry Deposition Probe (Donahue 2007)

Ein allgemeiner Arbeitsablauf, um eine Probe mit der Slurry Deposition Methode wiederherzustellen, wird nach Donahue (2007) folgend beschrieben.

- **Arbeitsablauf zur Wiederherstellung einer Bodenprobe**

Folgendes wird an Labor Equipment benötigt:

- Triaxialzelle
- Endkappen für die Probe:
 - Untere Endkappe mit $d = 100 \text{ mm}$
 - Obere Endkappe mit etwas geringerem Durchmesser als der Triaxialzylinder
- 2 Filtersteine:
 - Der untere Filterstein sollte den gleichen Durchmesser wie die untere Endkappe haben
 - Der obere Filterstein sollte wie die Endkappe einen geringeren Durchmesser haben
- Gummimembran

- Gummimembran zur Hälfte der Höhe geschnitten
- 3 O-Ringe:
 - 2 passende für obere und untere Endkappe
 - 1 groß genug um über den Triaxialzylinder zu passen
- Halbschalenzylinder ($d = 10 \text{ cm}$, $h = 20 \text{ cm}$)
- Vakuumbehälter
- Vakuumpumpe regulierbar
- Belastungsstange
- Zusätzliche Endkappe
- Zusätzliche Gewichte für die Konsolidierung
- 2 Stück Filterpapier, $d = 10 \text{ cm}$
- Rostfreier Stahlring mit Dichtungen
- Plexiglas Rohr, $d = 10 \text{ cm}$

Schritt 1: Montagevorbereitung der Zylinderform

Als erstes legt man die untere Endkappe samt Filterstein auf die dafür vorgesehene Stelle in der Triaxialzelle. Der Filterstein verhindert, dass feine Bodenteilchen ausgeschwemmt werden. Man streift die Gummimembran über die untere Endkappe und fixiert sie mit einem O-Ring. Danach setzt man die Zylinderform über die Endkappe, sodass die Membran oben herausragt. Anschließend stülpt man die Membran über den oberen Rand des Zylinders und setzt ein Vakuum an der Form an. Man muss sicher stellen, dass die Membran nicht verdreht ist, um ein optimales Anliegen der Membran an den Zylinder zu erreichen.

Schritt 2: Vorbereitung der Bodenprobe

Der Wassergehalt und die Konsistenzgrenzen des vorhandenen Bodens müssen bestimmt werden, um die notwendige Wasserzugabe zu errechnen. Die Probe sollte eine dickflüssige, breiige Konsistenz haben. Das zugegebene Wasser muss entlüftet sein. Um keine Lufteinschlüsse in der Probe zu erhalten, muss die Suspension während des Mischvorganges immer wieder entlüftet werden. Dabei wird ein Vakuumbehälter über die Mischform gestülpt. Fünf Wiederholungen der Entlüftung

sollten genügen, um nahezu keine aufsteigenden Bläschen an der Oberfläche zu sehen.

Schritt 3: Konsolidierung

Die durchmischte und entlüftete Probe wird jetzt in die Zylinderform gegossen, wobei so wenige Lufteinschlüsse wie möglich erzeugt werden sollten. Auf die Probe werden anschließend ein Filterstein und die obere Endkappe gesetzt. Der Filterstein sollte etwas Bewegungsspielraum zur Membran haben, um sich während der Konsolidierung bewegen zu können. Danach wird die halbe Membran über die erste Membran am oberen Rand des Zylinders gestülpt. Der große O-Ring wird um diesen Membrankragen am Zylinder gelegt, um diesen Übergang luftdicht zu machen. Mit dem letzten O-Ring wird die halbe Membran an der Endkappe befestigt. Zum Schluss muss noch die Drainageleitung an der Endkappe angeschlossen werden (siehe Abb. 7).

Jetzt kann mit einer Vakuumpumpe, einem Vakuumzwischenbehälter und zusätzlichem Gewicht mit der Konsolidierung begonnen werden. Wenn im Zwischenbehälter keine Luftblasen aufsteigen, sind die Übergänge der Membranen dicht. Das Zusatzgewicht wird benötigt, um die Konsolidierung zu beschleunigen. Wenn die obere Endkappe und der Filterstein richtig plaziert wurden, sollte die Endkappe langsam durch das Gewicht und das Vakuum in die Zylinderform einsinken. Der O-Ring muss so hoch angebracht sein, dass dieser beim Absinken der Endkappe nicht abgestreift wird oder ein Einsinken verhindert.

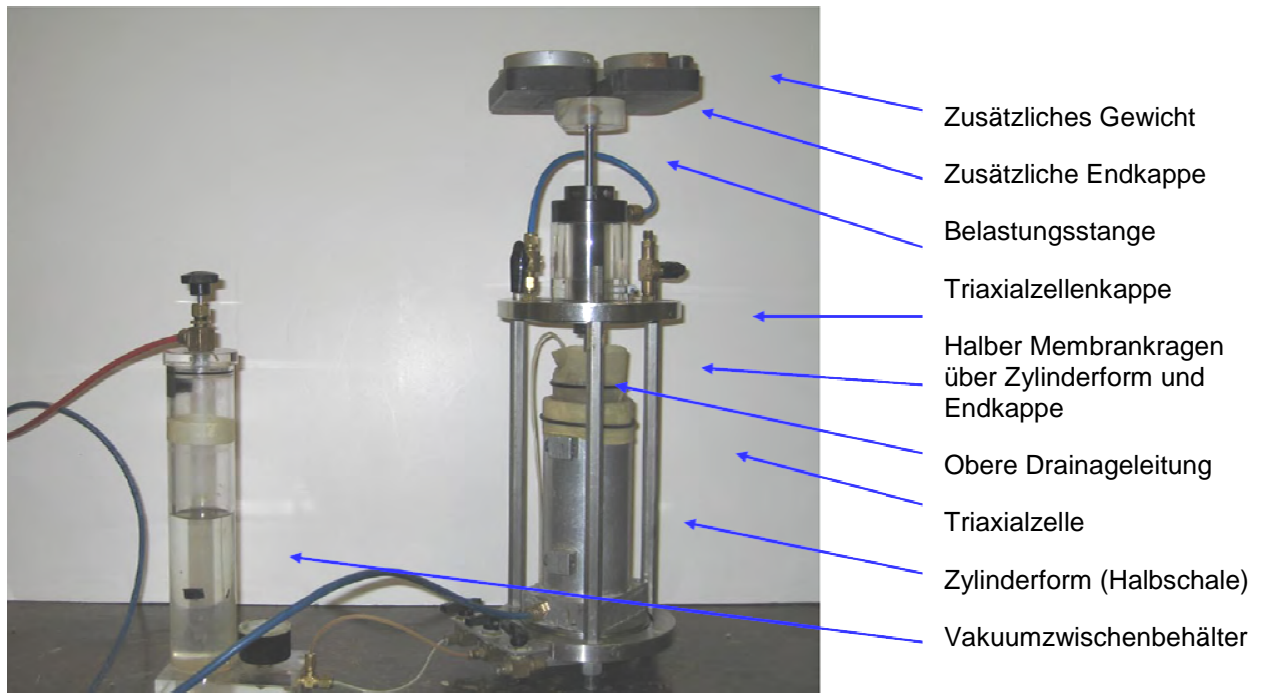


Abb. 7 Versuchsapparatur zur Konsolidierung (Donahue 2007)

Schritt 4: Fertigstellung

Die Konsolidierungszeit sollte mindestens 48 Stunden betragen, bevorzugt werden 72 Stunden. Nach der Konsolidierung werden zuerst die Gewichte und die Belastungsstange entfernt. Danach wird der obere kleine O-Ring von der Endkappe, sowie der große O-Ring vom Zylinder entfernt. Dieser wird der Drainageleitung entlang nach unten geführt - die Drainageleitung darf dabei nicht entfernt werden. Als nächstes wird der Membrankragen vom Zylinder über die Endkappe gestülpt. Wichtig ist, dass die Endkappe dabei nicht verschoben wird oder den Kontakt zur Probe verliert. Die Membran wird fixiert, indem man den kleinen O-Ring über die Membran schiebt - dabei dürfen keine Falten in der Membran zwischen Zylinder und O-Ring entstehen. Jetzt kann die Vakuumleitung entfernt und die Zylinderhalbschalen demontiert werden. Wichtig ist, dass die Veränderung der Höhe der Probe während jedes Schrittes aufgezeichnet wird.

Werden alle Schritte wie beschrieben durchgeführt und gibt man der Probe genug Zeit, um zu konsolidieren, erhält man eine „selbststehende“ Probe, die vorher eine dicke Flüssigkeit war. Diese kann für einen statischen oder dynamischen Triaxialversuch oder für einen Oedometerversuch (Kompressionsversuch) verwendet werden.

Vorteil der Slurry - Deposition Methode ist, dass der Zeitaufwand im Vergleich zu anderen Methoden relativ gering ist. Abgesehen von der Konsolidierungszeit, die je nach Bodenmaterial variieren kann. Die Konsolidierung darf nicht abgebrochen werden solange nicht der größte Teil der Setzungen abgeschlossen ist.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist es, dass nahezu keine Schichtung wie sie bei natürlichen Sedimenten zumeist beobachtet wird, zustande kommt.

2.4.2 In-Place Wet Pluviation Methode

Die traditionelle „Wet Pluviation“ wird in einem riesigen Tank mit einer großen Menge an Boden vorgenommen. Meist werden die Proben von schluffigen Böden mittels Bohrungen entnommen. Dies ist eine sehr teure Maßnahme und liefert relativ wenig Boden. In wenigen Fällen kann Probenmaterial mit einem Bagger geschürft und dadurch eine große Menge an Material kostengünstig entnommen werden. Daher musste eine alternative Methode entwickelt werden, bei der die gemischte Suspension direkt in die Form eingebracht wird. Die In-Place Wet Pluviation ist der Wet Pluviation sehr ähnlich. Die angemischte Suspension aus Boden und Wasser wird durch eine Wassersäule in die Zylinderform eingeregnet und kann sich dann natürlich absetzen. Dadurch erhält man eine natürliche Abfolge der Schichten. Der Unterschied ist, dass die Wet Pluviation in einem viel größeren Behälter durchgeführt wird und die Proben erst danach entnommen werden. Bei der In-Place Wet Pluviation wird die Sedimentation für nur eine Probe vorgenommen, die danach in dieser Form getestet wird. Mit dieser Methode ist es möglich, eine höhere Porenzahl e und eine geringere Dichte ρ der Probe zu erreichen.

Der wichtigste Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, eine geschichtete Probe herzustellen. Damit kommt man der natürlichen Schichtung eines Bodens am nächsten.

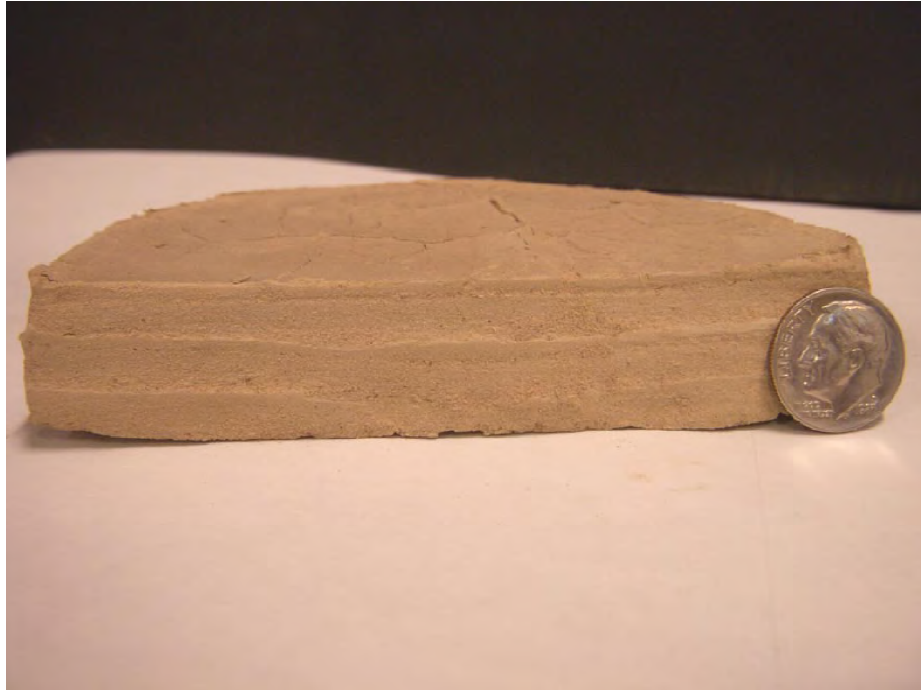


Abb. 8 Getrocknete In-Place Wet Pluviation Probe (Donahue 2007)

- **Arbeitsablauf zur Wiederherstellung einer Bodenprobe**

Zusätzlich zu den Versuchseinzelteilen der Slurry-Deposition Methode wird für die In-Place Wet Pluviation noch folgendes benötigt:

- 2 Stück Filterpapier, $d = 10 \text{ cm}$
- Rostfreier Stahlring mit Dichtungen
- Plexiglas Rohr, $d = 10 \text{ cm}$

Schritt 1: Montagevorbereitung der Zylinderform

Die Montage der Form erfolgt auf dieselbe Art und Weise wie bei der Slurry-Deposition Methode. Allerdings wird auf den unteren Filterstein noch zusätzlich ein Filterpapier gelegt. Die untere Endkappe und der Filterstein müssen mit entlüftetem Wasser gesättigt sein. Der Stahlring und das Plexiglasrohr werden erst gebraucht, wenn eine gewisse Probenhöhe im Zylinder vorhanden ist, können aber schon von Beginn an montiert werden, um ein späteres Stören der Probe zu vermeiden. Der Stahlring wird um die umgestülpte Membran am oberen Zylinderrand gelegt. Dabei darf die Membran nicht beschädigt werden. Die Dichtungen im Ring sollten eingefettet sein. Das Plexiglasrohr wird dann oben in den Stahlring hinein gedrückt.

Schritt 2: Vorbereitung der Bodenprobe

Die trockene Probe muss mit entlüftetem Wasser angemischt werden, wobei ein Wassergehalt von 200 % erreicht werden muss. Mit diesem hohen Wassergehalt entsteht, anders als bei der Slurry-Deposition Methode, eine sehr dünne Suspension. Die einzelnen Kornfraktionen lösen sich dabei leichter voneinander. Es sind daher auch nur 2 bis 3 Misch- und Entlüftungswiederholungen notwendig, um ein gut entlüftetes Material zu erhalten.

Schritt 3: Einregnung der Probe (Pluviation)

Um das Material einregnen zu lassen, wird ein langes dünnes Rohr mit einer Drahtmasche am Ende verwendet. Die Flüssigkeit wird durch das Rohr in die Form gegossen. Das Rohr muss im Kreis bewegt werden, um eine vollflächige Verteilung des Materials zu erreichen. Es dürfen keine Feinteile im Mischbehälter zurückbleiben.

Der Sedimentationsprozess für jede Schicht sollte innerhalb von 72 Stunden abgeschlossen sein. In Abb. 9 werden vier Sedimentationsstufen einer Ödemeterprobe gezeigt. Im ersten Behälter ist das Wasser nach 72 Stunden nahezu klar. Behälter zwei sedimentiert seit 48 Stunden, das Wasser beinhaltet noch kleine Mengen an Feinteilen. Die Probe im dritten Behälter befindet sich erst 24 Stunden im Prozess des Absetzens und ist daher noch sehr trüb. Im vierten Behälter wurde die Probe erst kürzlich eingebracht.

Nach 72 Stunden kann das Wasser vorsichtig aus dem Zylinder gesaugt werden, dabei sollten jedoch 6 cm Wasser über der sedimentierten Schicht bestehen bleiben. Der gesamte Vorgang vom Einregnen der Suspension bis zum Absaugen des Wassers wird so oft wiederholt wie nötig, um die gewünschte Probenhöhe zu erreichen. Über der letzten Schicht darf nur noch eine sehr dünne Wasserüberdeckung zurückbleiben. Jetzt kann an der unteren Endkappe ein Vakuum angesetzt werden, um das Wasser durch die Probe hindurchzuziehen. Dabei darf allerdings die oberste Schicht im Zylinder nie trocken werden (Wasser beigegeben). Das an der Endkappe angesetzte Vakuum darf nicht so groß sein, dass die Membran von der Zylinderwand weggesaugt wird. Der Stahlring und das Plexiglasrohr können entfernt werden.

Schritt 4: Konsolidierung

Dieser Schritt ist gleich dem Schritt 3 der Slurry Deposition Methode. Wie groß das Vakuum sein sollte, muss ausgetestet werden. Es darf, abhängig von der Bodenprobe, keine zu schnelle Durchströmung der Probe erfolgen.

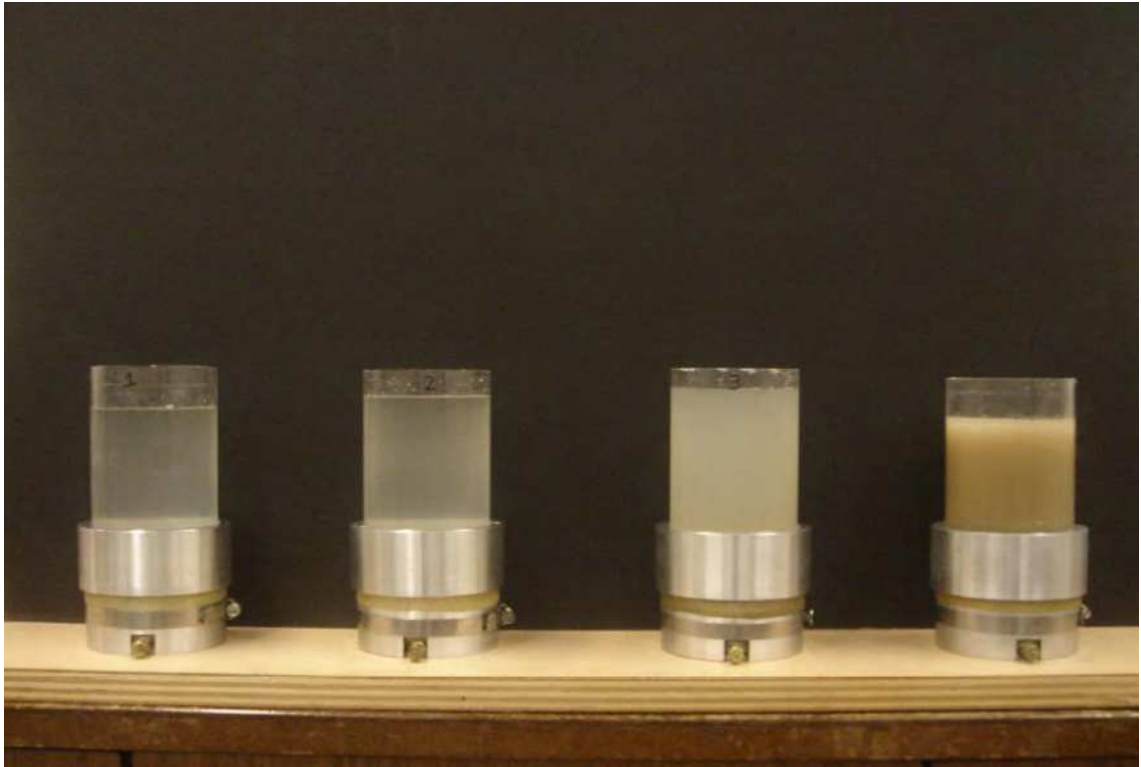


Abb. 9 In-Place Wet Pluviation Proben zu verschiedenen Zeitpunkten (Donahue 2007)

3 Probenherstellung

Zur Herstellung der künstlichen Proben wird vorerst nur die Slurry Deposition Methode verwendet. Es soll ein funktionierender Versuchsablauf erarbeitet werden, mit dem die unterschiedlichen Probenmaterialien verarbeitet werden können. Die Besonderheiten und Voraussetzungen, auf die dabei geachtet werden muss, unterscheiden sich je nach Material und sollten dokumentiert werden, um den Herstellungsablauf zu verbessern.

3.1 Allgemeine Literatur

Aus vorhandener Literatur (Watabe et al. 2015, Kuerbis et al. 1988, Carraro et al. 2008) ist die Testung von wiederhergestellten Bodenproben bekannt. Allerdings ist kein Versuchsablauf zur Herstellung einer solchen Probe zu finden. Damit sind vor allem das Verfahren zum Mischen des Materials sowie die verwendeten Wassergehalte gemeint. Der Wassergehalt w kann mit dem 1,5 bis 2-fachen der Fließgrenze w_L nach Watabe et al. (2015) beziffert werden. Weiters sind über die Konsolidierung und Vorbelastung dieser Proben keine Angaben aus bereits durchgeführten Versuchen vorhanden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein gesamter Versuchsablauf erarbeitet, getestet und mit den gewonnenen Erkenntnissen verbessert. Es wäre zu erwarten, dass die Ergebnisse aus den durchgeführten Oedometerversuchen direkt miteinander verglichen werden können. Dies ist nicht der Fall, da die dickflüssige Suspension, die später zu einer festen Probe wird, keinen natürlichen Primärspannungszustand im Vergleich zur natürlich konsolidierten Probe hat. Die Steifigkeiten können nicht verglichen werden, und die Rückrechnung mit der grafischen Methode nach Casagrande für die Vorkonsolidierungsspannung ist nicht zielführend um einen Vergleich von künstlichen und natürlichen Proben darzustellen. Durch den Vergleich der Porenzahl e , können die künstlichen, wiederhergestellten und natürlichen Proben miteinander verglichen werden. Laut Watabe et al. (2015) ist die Porenzahl einer natürlichen Bodenprobe im Allgemeinen höher, als die einer künstlich hergestellten Probe. Außerdem ist die Anordnung der Bodenteilchen in der künstlich wiederhergestellten Probe bei der Sedimentation ohne Ausnahme mit kleineren Poren versehen. Kuerbis et al. (1988) entwickelte die originale Slurry Deposition Methode, mit der er zur damaligen Zeit Sandproben wiederherstellte. Auch hier wurden die Porenzahlen der natürlichen und künstlichen Proben miteinander verglichen und interpretiert.

Da in den meisten Veröffentlichungen und Publikationen (Watabe et al. 2015, Carraro et al. 2008) die Porenzahl als repräsentativer Parameter der Bodenproben herangezogen wird, liegt der Fokus in dieser Arbeit ebenfalls darauf, bei der künstlichen Herstellung von Bodenproben, annähernd die Porenzahl e des natürlichen Bodens zu erreichen bzw. bei einer weiteren Wiederherstellung der Probe die annähernd gleichen Werte für die Porenzahl e zu erreichen.

3.2 Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtungen werden zum Teil vom Labor für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz genutzt, und aus alten Versuchseinrichtungen zusammengesetzt, die anderweitig nicht mehr verwendet werden.

- **Mischapparatur**

Die Anforderung an die Mischapparatur ist folgende: Es muss eine Entlüftung des zu mischenden Materials durch ein Vakuum möglich sein, ohne den Behälter dabei zu öffnen.

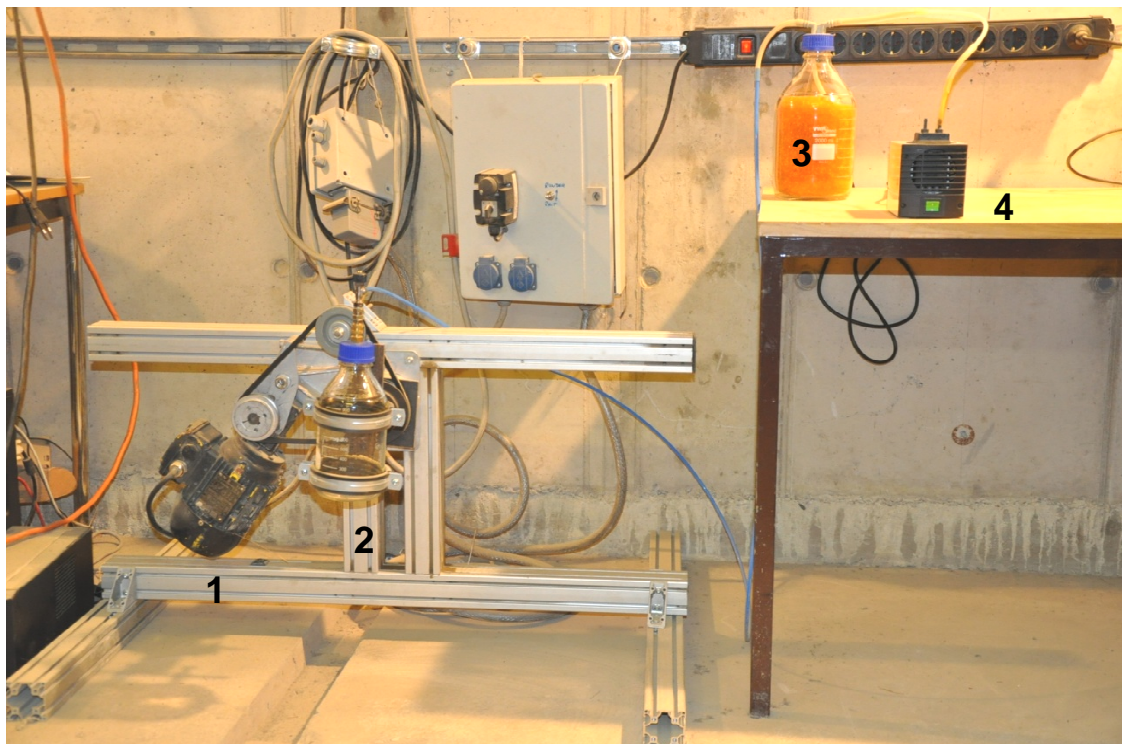


Abb. 10 Mischapparatur mit Vakuumentlüftung

- | | |
|--------------------------------|-----------------|
| 1 Elektromotor mit Übersetzung | 2 Mischbehälter |
| 3 Vakuumzwischenbehälter | 4 Vakuumpumpe |

Für den Antrieb der Mischanlage wird ein Elektromotor der Firma Lenze (2012) verwendet. Durch die Übersetzung des Getriebes und die angebrachten Keilriemenscheiben ergibt sich eine Rotation des Mischbehälters von 30 Umdrehungen pro Minute. In den Deckel des Mischbehälters wurde eine pneumatische Steckkupplung eingedreht, um durch einen Schlauch und ein regelbares Ventil ein Vakuum aufzubringen. Der Schlauch führt vom Mischbehälter zum Zwischenbehälter, der mit einem Entfeuchtungsgranulat (Silica Gel) der Firma Roth (2015) gefüllt ist. Der Zwischenbehälter zur Entfeuchtung der Luft, die aus dem Mischbehälter kommt, ist notwendig, da die Vakuumpumpe durch feuchte Luft beschädigt werden könnte.



Abb. 11 Vakuumpumpe der Firma KNF - Neuberger (2015)

- **Einfüllform des gemischten Bodens**

Es wird der Versuchsaufbau einer manuellen Oedometerzelle, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, verwendet. Da das Volumen des Probenmaterials durch die Zugabe von Wasser deutlich erhöht wird, benötigt man eine Einfassung, die auf den Oedometerring geschraubt wird, um die Suspension dort einzufüllen. Dieser Zylinder, der die dickflüssige Probe in Form halten soll, wurde mit einem 3D Drucker aus Kunststoff gedruckt. Großer Vorteil dieser Methode ist es, dass der Zylinder im Nachhinein problemlos bearbeitet und angepasst werden kann. Am unteren Flansch wird eine flächige Gummidichtung zurechtgeschnitten und aufgeklebt, um das Austreten der Suspension zwischen Oedometerring und Kunststoffzylinder zu verhindern (siehe Abb. 13). Der verwendete Kunststoff ist von der Firma Styrolution (2015).



Abb. 12 3D gedruckter Schalungszylinder

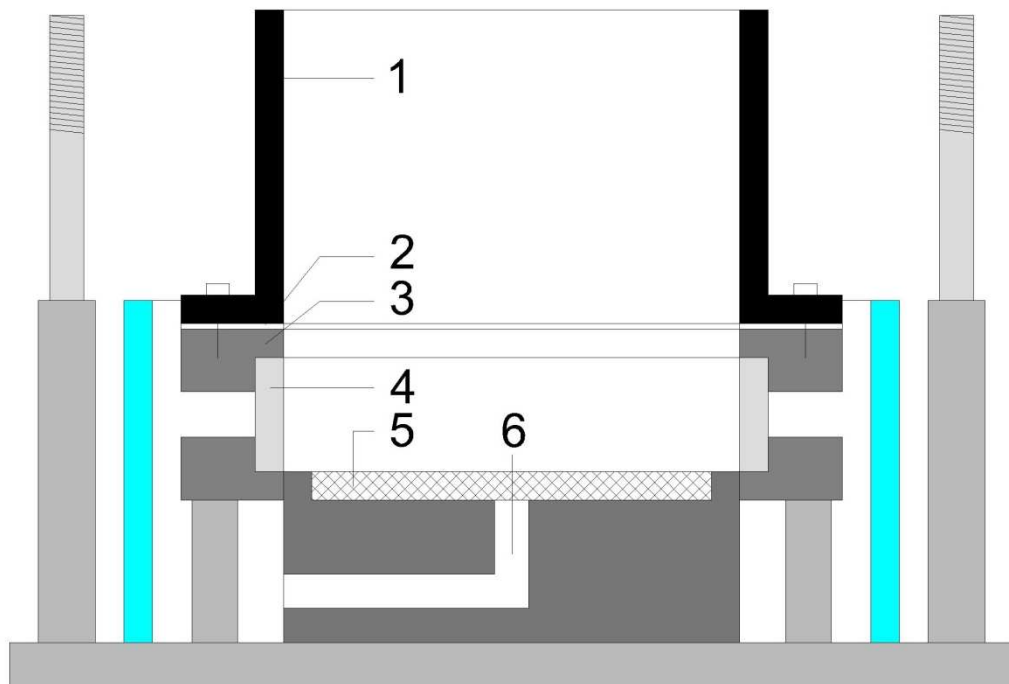


Abb. 13 Systemskizze Oedometerzelle mit Kunststoffzylinderaufsatz

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 Kunststoffzylinder | 2 flächige Dichtung |
| 3 Oedometer Außenring | 4 Oedometer Innenring |
| 5 Filterstein | 6 Drainage |

3.3 Herstellungsablauf

- **Vorbereitung**

Zu Beginn werden aus den natürlichen Proben, Oedometerproben oder auch Triax-Proben herausgeschnitten. Je nach Ort standen verschiedene Entnahmearten des natürlichen Bodens zur Verfügung. Im Fall von St. Kanzian führte die Firma Keller in diesem Gebiet einen Feldversuch für Düsenstrahlverfahren durch, um die Parameter in diesen feinkörnigen Böden zu untersuchen. Dabei war es möglich einen Bohrkern bis in eine Tiefe von 8 Metern zu bekommen, um bodenmechanische Untersuchungen an diesem Boden durchzuführen und Bodenkennwerte zu ermitteln.



Abb. 14 Bohrkern aus St. Kanzian (Kärnten)

Die Abschnitte, die sowohl bei Oedometerproben als auch bei Triaxialproben anfallen, werden dazu verwendet, um in einem weiteren Schritt künstliche Proben aus der jeweiligen Tiefe, aus der die natürlichen Proben herausgeschnitten wurden, herzustellen, und die Ergebnisse der Oedometerversuche zu vergleichen. Die künstliche Herstellung der Proben beschränkt sich auf Proben die mit einem Oedometerversuch untersucht werden.

Wenn die Möglichkeit nicht gegeben ist, dass Bohrkern des Bodens zur Verfügung stehen, kann eine Probe mittels Stechzylinder aus dem Boden entnommen werden. Dabei ist nur bei tiefen Baugruben eine größere Tiefe zu erreichen aus der die Probe entnommen werden kann. Der Stechzylinder hat einen Durchmesser von 10 cm und

eine Höhe von 15 cm, am unteren Ende hat er eine scharfe Kante um das Einstechen zu erleichtern. Die Probe wird im Labor mit einer hydraulischen Presse aus dem Zylinder herausgepresst. Danach kann aus der Probe z.B. eine Oedometerprobe herausgeschnitten werden.



Abb. 15 Links: Steckzylinder leer; Rechts: Ausgestochene Probe

- **Bestimmung des Wassergehalts**

Nachdem eine natürliche Oedometerprobe ausgeschnitten wurde, wird mit einem Teil des Abschnittes eine Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung nach ÖNORM EN ISO 17892-1 durchgeführt. Dies sollte so schnell wie möglich nach dem Zuschneiden geschehen, um einen repräsentativen Wassergehalt zu erhalten. Ist dies nicht möglich, kommt es zu einer Verfälschung des Wassergehalts, da das Probenmaterial austrocknet.

- **Trocknung des Bodenmaterials**

Sind alle Oedometerproben aus den natürlichen Bodenproben herausgeschnitten, werden die Abschnitte in einer Schüssel gesammelt und in den Ofen zur Trocknung gegeben. Es ist wichtig, dass die Temperatur des Ofens nicht zu hoch ist, da bei solch feinkörnigen Böden die vorhandenen Tonanteile bei zu hohen Temperaturen zerstört werden können. Die ideale Temperatur liegt zwischen 60 und 65 °C

- **Mischvorgang**

Vor dem Mischen wird eine bestimmte Masse des getrockneten Bodens mit einem in Tab. 3 genannten Wassergehalt versetzt und in den Mischbehälter gegeben. Bei dem Mischbehälter handelt es sich um eine Laborflasche mit einem Fassungsvermögen von

1000 ml. Um eine gute Durchmischung zu erreichen darf die Flasche nicht ganz voll sein. Die Trockenmasse pro Mischung in allen Versuchen wurde mit 400 g angenommen. Der Mischbehälter ist nach der Wasserzugabe, abhängig vom Wassergehalt des jeweiligen Bodens, mit ungefähr 600 ml gefüllt. Das beigegebene Wasser sollte destilliert und entlüftet sein.

Tab. 3 Wassergehälter für den Mischvorgang

Ort	Trockenmasse m_d [g]	Wassergehalt w [%]	Wassermasse m_w [g]
St. Kanzian	400	70	280
Ginau	400	85	340
Salzburg	400	85	340

Nachdem das jeweilige Probenmaterial mit der entsprechenden Masse an Wasser in den Mischbehälter eingefüllt wurde, wird für 15 Minuten ein Vakuum am Behälter angesetzt, um die Luft aus den Hohlräumen die sich während des Einfüllens des trockenen Probenmaterials gebildet haben, zu saugen. Nach der Entlüftung wird der Schlauch für das Vakuum entfernt und es kann mit dem Mischen begonnen werden. Für die reine Mischzeit wurden 6 Stunden angenommen. In dieser Zeit konnte eine vollständige Desintegration der Bodenteilchen erreicht werden.

- **Konsolidierung**

Während des Mischens kann der Kunststoffzylinder und der Oedomerring zusammengesetzt werden, damit die Eingussform bereit steht, wenn das Probenmaterial fertig durchmischt ist. Am Boden der Form wird zusätzlich noch ein Filterpapier eingelegt (siehe Abb. 16). Sobald der Mischvorgang beendet ist, wird der Behälter aus der Mischapparatur heraus genommen und das gemischte Probenmaterial umgehend in die Form gegossen. Der Rest des Materials, das in der Flasche verbleibt, wird ausgewaschen, aufgefangen und getrocknet und wird bei der nächsten Wiederherstellung dieser Probe wieder verwendet. Die Höhe der eingefüllten Suspension muss gemessen werden, um die Setzungen berechnen zu können. In den Zylinder wird anschließend umgehend ein Filterpapier und ein Filterstein mit einer 250 g Gewichtscheibe (0,5 kPa) auf die Suspension gelegt. Nach 5 Minuten wird das Gewicht um weitere 250 g (1,0 kPa) erhöht. Mit den seitlichen Verlängerungen der Gewindestangen und den Flacheisen, werden die Gewichter in Position gehalten um in der weichen Suspension eine Schiefstellung zu verhindern (siehe Abb. 17). Nach weiteren 10 Minuten wird eine Scheibe mit 500 g (2,0 kPa) hinzugefügt. Die Flacheisen müssen neu positioniert werden das eine Schiefstellung der Gewichtscheiben

verhindert wird. Der Aufbau wird für 30 Minuten stehen gelassen. Nach insgesamt 45 Minuten werden alle Gewichte samt Filterstein und Schraube entfernt. Ein Filtergewicht, das später beim Oedometerversuch verwendet wird und zusätzlich 1000 g Konsolidierungsgewicht (3,65 kPa), wird auf die Suspension gegeben. Nach einer Stunde werden noch weitere 1500 g an statischen Gewichten (6,65 kPa) auf die Probe gestellt (siehe Abb. 18) und für mindestens 12 Stunden stehen gelassen. Dabei wird Wasser durch den unteren und den oberen Filter ausgepresst und die Probe verliert an Höhe. Die Führung der Gewichte darf nicht zu fest sein, um eine vertikale Verschiebung zu ermöglichen.



Abb. 16 Eingussform für das Probenmaterial



Abb. 17 Links: Filterstein mit Schraube + 250 g ; Rechts: Filterstein + 1000 g



Abb. 18 Links: Filtergewicht + 1000 g ; Rechts: Filtergewicht + 2500 g

Tab. 4 Konsolidierungsablauf mit Gewichten

Schritt	Zeitpunkt [min]	Masse [g]	Vertikalspannung [kPa]	Anmerkung
1	0	+ 250	0,50	Filterstein mit Schraube (87 g) + Gewichtsscheibe
2	5	+ 250	1,0	
3	15	+ 500	2,0	
4	45	- 1087		Filterstein mit Schraube (87 g) und 1000 g herunter
5	45	+ 1840	3,65	Filtergewicht (840 g) + 1000 g hinauf
6	60	+ 1500	6,65	

Eine Konsolidierungsbelastung nur mit statischen Gewichten aufzubringen wäre durchaus möglich, das benötigte Gewicht um die gewünschten Setzungen des Materials zu erreichen, müsste allerdings sehr groß sein. Daher wurde eine Adaptierung an den vorhandenen Oedometerzellen vorgenommen, die es erlaubt die Konsolidierung mit regulierbarer Druckluft weiterzuführen.

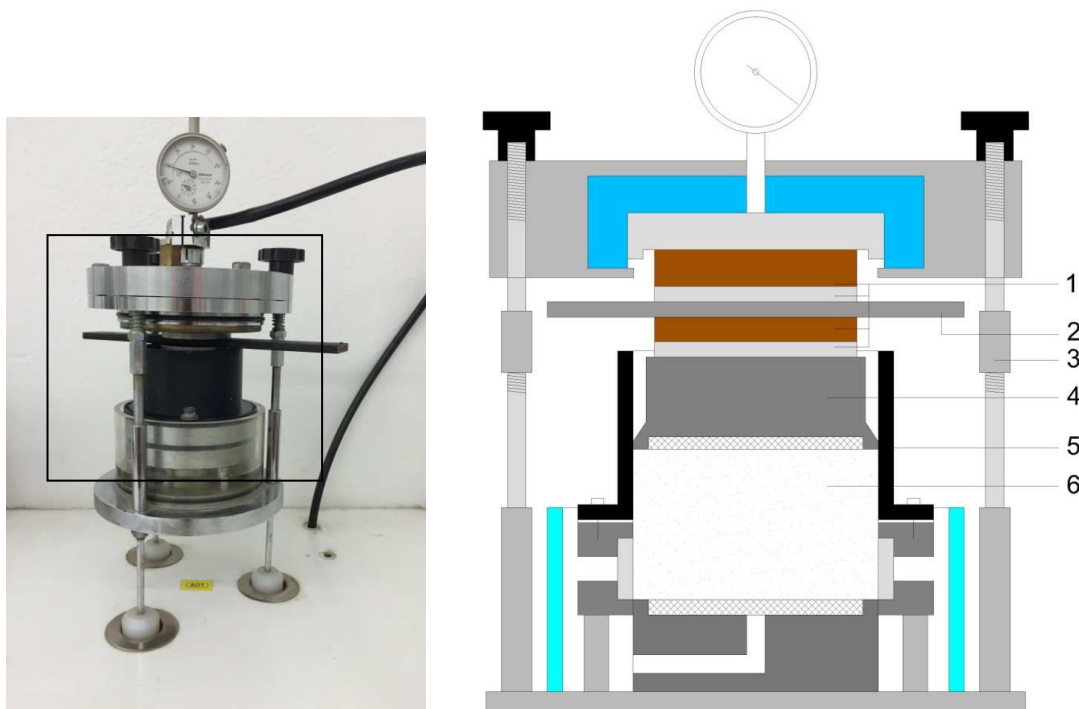


Abb. 19 Druckluftkonsolidierung in der Oedometerzelle

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1 Metallzwischen Scheiben | 2 Flacheisen |
| 3 Gewindeverlängerung | 4 Druckstempel (Filtergewicht) |
| 5 Kunststoffzylinder | 6 Bodenprobe |

Nach der Konsolidierung mit den Gewichten wird alles, bis auf den Druckstempel (Filtergewicht) und die Gewindeverlängerungen am Rand, entfernt. Um die Distanz zwischen der Druckkappe und dem Druckstempel zu überbrücken werden runde Metallscheiben mit verschiedenen Dicken verwendet (siehe Abb. 19). Da die Druckkappe nur einen geringen Setzungsweg zulässt (ca. 1 cm), wird zwischen den Metallscheiben ein längeres Flacheisen eingelegt. Dadurch kann durch ablassen der Druckluft die Membran im Inneren der Druckkappe angehoben, und eine weitere Metallscheibe mit einer definierten Höhe unter dem Flacheisen eingelegt werden. Würde man dies nicht so machen, müsste die Druckkappe mehrmals abmontiert werden und es wäre nicht möglich, die Gesamtsetzung während des Konsolidierens zu messen.

Tab. 5 Konsolidierungsablauf mit Druckluft

Schritt	Zeitpunkt [min]	Spannung [kPa]	Anmerkung
1	0	15	
2	15	30	
3	30	60	
4	60	100	
5	90	170 (200)	Spannung je nach Material

In Tab. 5 werden die einzelnen Konsolidierungsschritte mit den jeweilig aufgebrachten Vertikalspannungen, die zur Vorkonsolidierung benötigt werden, aufgezeigt. Bei Schritt drei wird zumeist eine weitere Metallscheibe eingelegt, da die Setzungen zu Beginn am größten sind und mit jeder Belastungsstufe geringer werden. Die Spannung in Schritt fünf ist abhängig vom Probenmaterial, so ist bei Proben aus St. Kanzian und Ginau eine Spannung von 170 kPa und aus Salzburg/Riedenburg von 200 kPa erforderlich. Diese Werte wurden mit Zunahme der Anzahl an Versuchen angepasst, um nach der Konsolidierung eine Probe zu erhalten, deren Konsistenz es erlaubt, sie weiter zu bearbeiten. Mit einer zu geringen Endkonsolidierungsspannung ist es nicht möglich die Probe vernünftig in einen Oedometer einzubauen und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Es wird angenommen, dass nach rund 24 Stunden ca. 95 % der Setzungen abgeschlossen sind. Es wurde jedoch bei keiner Probe eine Zeit-Setzungskurve mitdokumentiert.

- **Vorbereitung zum Oedometerversuch**

Nach der Vorkonsolidierungsphase, muss die Probe für den Oedometerversuch zugeschnitten werden. Zuerst werden die Druckkappe, alle Metallscheiben und die Gewindeverlängerungen entfernt. Danach wird das Wasser im Zwischenraum zwischen Kunststoffzylinder und Druckstempel abgesaugt. Unter ständigem Druck auf den Druckstempel kann der Kunststoffzylinder heruntergezogen werden. Wichtig ist der Druck auf den Druckstempel, ansonsten könnte die Probe durch das Herunterziehen auseinander gerissen werden.



Abb. 20 Links: Probe nach der Vorkonsolidierung; Rechts: Zylinder entfernt

Nachdem der Zylinder abgenommen worden ist, kann der äußere Oedometerring aus dem Oedometergehäuse herausgenommen werden. Der Druckstempel kann auch entfernt werden. Wie in Abb. 21 ersichtlich, hat die Probe eine ausreichende Standfestigkeit, um gut bearbeitet werden zu können. Bevor der äußere Ring abgehoben werden kann, sollte mit einer Spachtel oder einem Messer die seitliche Fläche der Probe etwas geglättet bzw. abgekratzt werden, damit beim Abheben des Ringes keine Schäden an der Probe entstehen.

Um später Parameter wie Porenzahl e , Porenanteil n und Sättigungsgrad S_r errechnen zu können, muss als nächster Schritt ein Probenteil entnommen werden, um den Wassergehalt zu bestimmen. Der Probenteil der zur Bestimmung des Wassergehaltes

verwendet wird, sollte möglichst aus dem inneren der Probe kommen. Damit ist gemeint, dass die Randflächen vorher abgeschnitten werden sollten, es könnte sich noch Wasser von der Vorkonsolidierung am Rand befinden, das den Wassergehalt verfälschen würde. Die feuchte Probe sollte mit einer Waage mit einer Messgenauigkeit von 1/10000 Gramm gewogen werden, um einen exakten Wassergehalt zu erhalten. Mit einem Messer mit sehr feiner Klinge können die Proben am einfachsten zugeschnitten werden. Abhängig vom Material kann es bei der Bearbeitung der Probe durch drücken und schneiden zu einer Änderung der Konsistenz kommen. Beim Probenmaterial aus Salzburg/Riedenburg ist dieses Verhalten sehr schwer zu verhindern. Die Bearbeitung der Probe sollte von innen nach außen erfolgen, damit kann in vielen, aber nicht allen Fällen der Ringspalt verhindert werden. Wenn das Probenmaterial durch die Bearbeitung zu plastisch wird, kann der Ringspalt nicht verhindert werden.



Abb. 21 Probe mit und ohne äußeren Oedometerring

Nachdem die Probe auf die Höhe des Oedometeringes (2 cm), wie in Abb. 22, zugeschnitten ist, wird der Ring samt Probe gewogen und die Masse im Formblatt für den Kompressionsversuch eingetragen. Die Tara des Ringes sollte davor schon bekannt sein, um anschließend die Feuchtmasse m_f der Probe im Ring zu ermitteln.



Abb. 22 Fertige Oedometerprobe

Nachdem die Masse des Ringes mit Probe festgehalten wurde, kann der äußere Ring montiert werden. Anschließend wird der verschraubte Ring in die Oedometerzelle eingesetzt und der Druckstempel darauf gesetzt (siehe Abb. 23).



Abb. 23 Einbau der Probe zum Oedometerversuch

- **Oedometerversuch nach ÖNORM EN ISO 17892-5**

Der Oedometerversuch wird wie in Kapitel 2.3 beschrieben durchgeführt. Die Dauer eines Versuches beträgt 14 Tage, für jede Belastungsstufe sind 24 h vorgesehen. Die Erhöhung der Laststufe und die Einstellung der Vertikalspannung, abhängig von der Genauigkeit des Versuchsgeräts, sollten so exakt wie möglich sein.

- **Nachbereitung**

Nach Abschluss des Oedometerversuchs, kann die Probe aus der Oedometerzelle ausgebaut werden. Es ist dabei darauf zu achten, dass Probenreste am Druckstempel zurück bleiben können, diese müssen abgekratzt werden und mit der restlichen Probe getrocknet werden. Durch die Trocknung der Probe kann anschließend die Trockenmasse m_d bestimmt werden. Die Trockendichte ρ_d kann nach dem Versuch mit dem entsprechenden Wassergehalt w errechnet werden.



Abb. 24 Oedomterprobe vor der Trocknung

Bevor die Probe komplett getrocknet werden kann, wird sie nur kurz in den Trocknungsofen gegeben, damit sie sich vom Oedometerring löst. Die Probe wird anschließend, noch im feuchten Zustand, horizontal durchgeschnitten. Dadurch erhält man einen oberen und unteren Teil der Probe, mit dem in weiterer Folge eine Bestimmung der Korngrößenverteilung nach ÖNORM EN ISO 178922-4 (2014) durchgeführt wird. Mit dieser Korngrößenverteilung kann untersucht werden, ob sich größere und kleinere Bodenteilchen in der dickflüssigen Suspension unterschiedlich absetzen. Wie in Abb. 25 dargestellt, wird die Probe mit einer Klaviersaite in der Hälfte geteilt und anschließend zur völligen Trocknung in den Ofen gegeben.



Abb. 25 Halbierung der Probe für die Korngrößenverteilung

Die Probe sollte möglichst genau in der Mitte geteilt werden, um eine annähernd gleiche Massenverteilung zu erhalten. Die Korngrößenverteilungen der jeweiligen Proben aus den verschiedenen Entnahmegebieten sind in Kapitel 4.3 dargestellt.

4 Ergebnisse

4.1 Oedometer

Die Ergebnisse aus den Oedometerversuchen werden jeweils von Proben aus den gleichen Tiefen dargestellt. Die natürlichen Proben (NP) werden mit den künstlich wiederhergestellten Proben (SD) anhand der Kompressionskurven, sowie der Porenzahl und anderen Bodenparametern, im gleichen Diagramm dargestellt, können aber nicht direkt verglichen werden. Mit der Beschreibung, „flache“ Kompressionskurve ist gemeint, dass die Probe ein „steiferes“ E_{oed} hat, bei „steiler“ Kompressionskurve ist E_{oed} „weicher“. Die anfänglich unterschiedlichen Setzungen sind darauf zurückzuführen, dass beim Einbau der Probe in den Oedometer nicht immer alle Zwischenräume zwischen Probe und Ring komplett geschlossen sind. Vor allem bei den künstlich hergestellten Proben kann dies oft zu größeren Anfangssetzungen führen.

4.1.1 Kompressionskurven St. Kanzian

- Probe aus einer Tiefe von 3,80 – 4,00 m

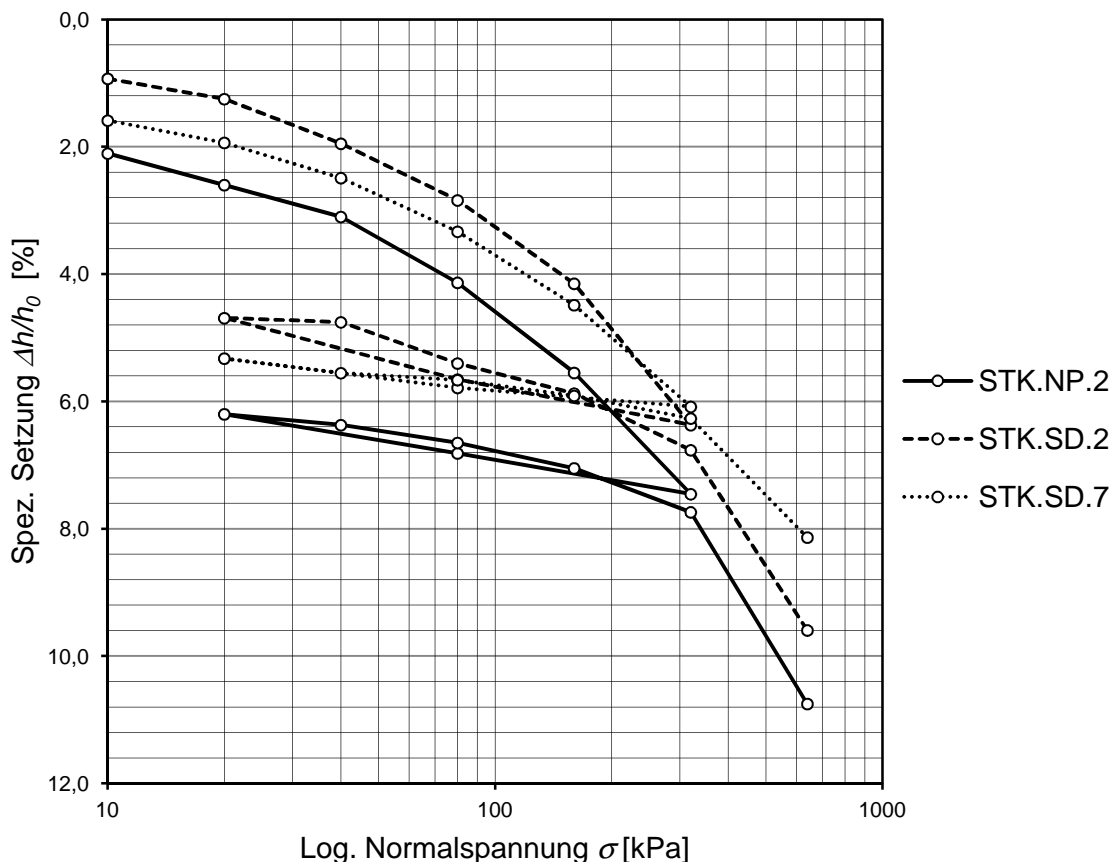


Abb. 26 Kompressionskurven von STK.NP.2, STK.SD.2, STK.SD.7

Von der ersten bis zur vierten Laststufe verlaufen die drei Kompressionskurven annähernd parallel, danach wird SD.7 etwas flacher, die beiden anderen bleiben aber fast parallel. Bei der Entlastung ist auch die SD.7 etwas flacher, die NP.2 und SD.2 sind auch während der Entlastung annähernd parallel und behalten dies auch bis zur letzten Laststufe bei.

Die Probe SD.7 wurde mit einem automatischen Oedometer getestet, NP.2 und SD.2 mit einem manuellen Oedometer. Dieser Umstand kann es durchaus erklären, dass die Kurve von SD.7 etwas flacher verläuft, da die Lastaufbringung beim automatischen Oedometer genauer ist als beim manuellen.

Tab. 6 Steifemodule aus Oedometer von STK.NP.2, STK.SD.2, STK.SD.7

		Laststufen [kPa]	10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
STK.NP.2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	2020	4000	3865	5654	8399	-
		Zweitbelastung	-	11765	14286	20000	23188	10631
STK.SD.2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	3125	2857	4494	6107	7207	-
		Zweitbelastung	-	30769	6178	16931	17978	11307
STK.SD.7	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	2857	3613	4754	6933	10019	-
		Zweitbelastung	-	8732	36280	32388	44907	17124

In Tab. 7 sind die Bodenparameter angeführt. Wie auch in der Literatur in Kapitel 3.1 erläutert wurde, ist die Porenzahl e bzw. der Porenanteil n der natürlichen Probe etwas höher als die der künstlich hergestellten Probe, so auch hier. Auch der Wassergehalt w der beiden künstlichen Proben ist nahezu identisch.

Tab. 7 Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, Tiefe 3,80 – 4,00 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
STK.NP.2	2,02	1,87	21,30	37,60	0,60	0,94
STK.SD.2	2,06	1,84	21,50	36,50	0,58	~1,00
STK.SD.7	2,06	1,76	21,60	36,50	0,58	~1,00

- Probe aus einer Tiefe von 4,68 – 4,77 m

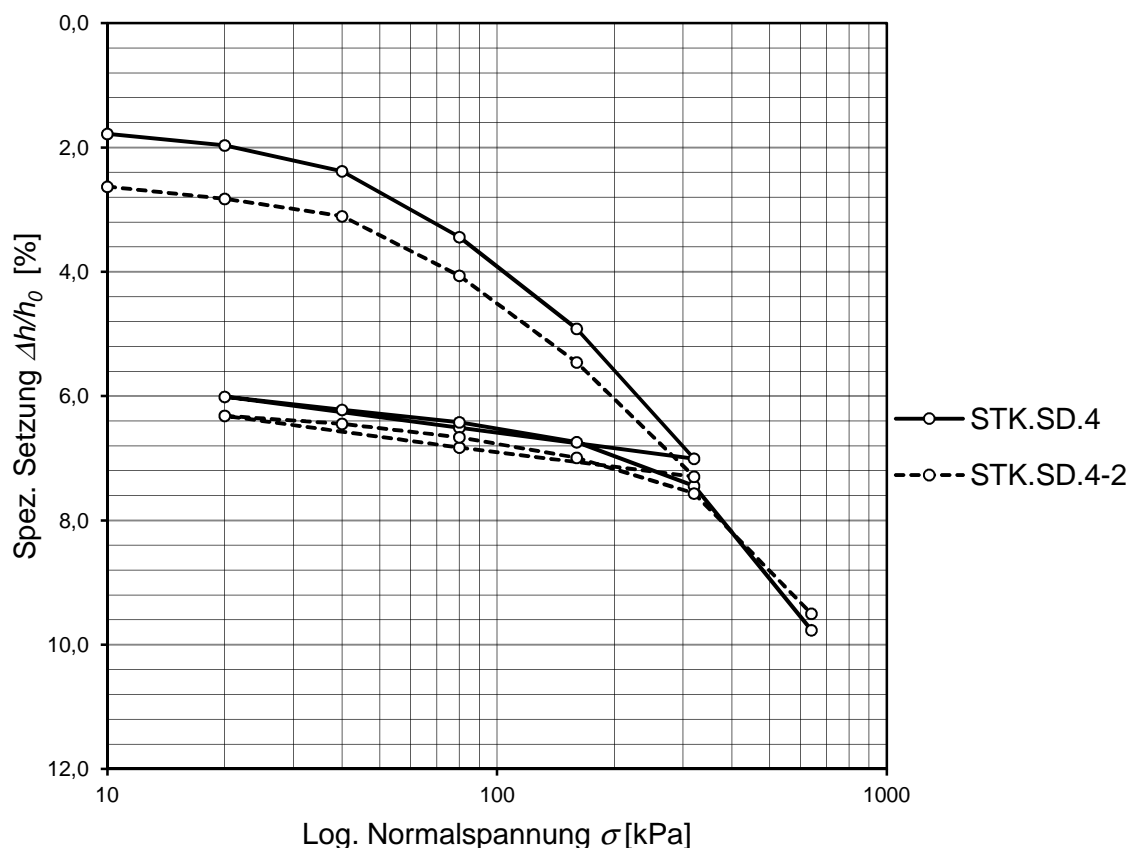


Abb. 27 Kompressionskurven von STK.SD.4 und STK.SD.4-2

Aus 4,68 – 4,77 m Tiefe gab es auch eine natürliche Probe NP.1, die Kompressionskurve ist allerdings nicht verwendbar da die Einstellung der pneumatischen Drücke der Belastungsstufen am manuellen Oedometer zu Beginn nicht wie geplant funktioniert haben. Die Kurvenverläufe der künstlichen Proben nähern sich während der Erstbelastung stetig aneinander an, während der Entlastung bleiben sie fast parallel. Auch bei der Zweitbelastung verlaufen die Kurven nahezu parallel. Obwohl die Kurve SD.4 mit geringerer Anfangssetzung begonnen hat, hat sie nach der letzten Laststufe eine größere Endsetzung.

Tab. 8 Steifemodule aus Oedometer von STK.SD.4 und STK.SD.4-2

Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	
STK.SD.4	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	5405	4819	3774	5424	7656	-
		Zweitbelastung	-	9524	20000	25000	22695	13793
STK.SD.4-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	5128	7143	4178	5745	8696	-
		Zweitbelastung	-	15385	18605	24242	27826	16537

Der Grund für die Unterschiede der Steifemodule mit zunehmender Laststufe von SD.4 ist die schwer regulierbare Einstellung der Laststufen im manuellen Oedometer. Obwohl es von der natürlichen Probe NP.1 keine Kompressionskurve gibt, sind die Bodenparameter, die durch Wassergehalt und Feuchtdichte bestimmt werden können, bekannt. Der Wassergehalt der natürlichen Probe ist wesentlich geringer als jener der künstlichen Probe. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Bohrkern, aus dem die Probe entnommen wurde, durch Trocknung nicht den natürlichen Wassergehalt repräsentiert. Bei den weiteren Bodenparametern treten geringe Unterschiede auf.

Tab. 9 Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, Tiefe 4,68 – 4,77 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
STK.NP.1	2,10	1,89	17,50	33,10	0,49	0,95
STK.SD.4	2,05	1,81	22,40	37,40	0,60	~1,00
STK.SD.4-2	2,09	1,84	19,80	34,60	0,53	~1,00

- 1. Probenserie aus einer Tiefe von 5,00 – 5,20 m

In 5,00 – 5,20 m Tiefe wurde eine Probe für einen Triaxialversuch herausgeschnitten, eine natürliche Oedometerprobe gab es hier nicht. Die Abschnitte wurden dann für zwei Probenserien mit jeweils zwei künstlichen Proben verwendet.

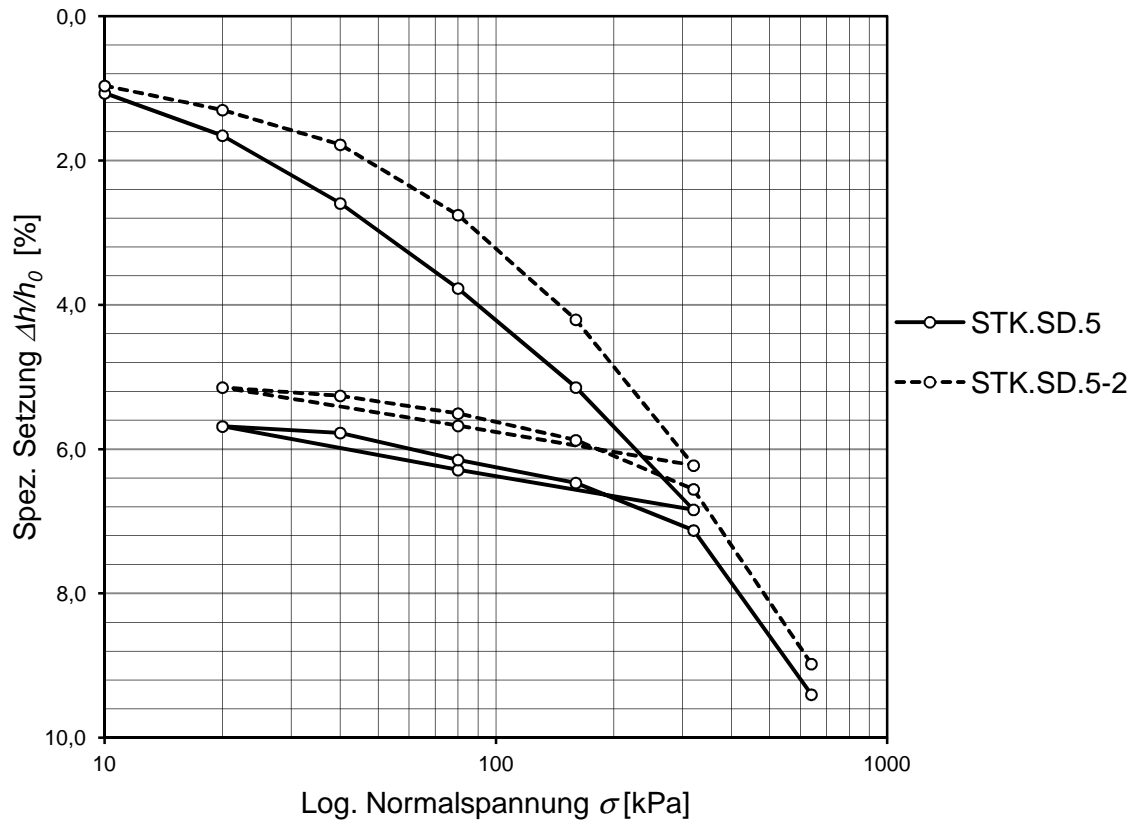


Abb. 28 Kompressionskurven von STK.SD.5 und STK.SD.5-2

Die Probe SD.5 wurde mit dem automatischen Oedometer getestet, SD.5-2 mit dem manuellen. Die Anfangssetzungen der beiden Proben sind nahezu gleich, im Erstbelastungsast, zwischen 10 und 40 kPa verläuft SD.5 etwas steiler als SD.5-2, danach wieder nahezu parallel. In der Entlastung, als auch in der Zweitbelastung, sind die beiden Proben annähernd parallel.

Da die Probe SD.5 eine der ersten künstlichen Proben war, wurde noch eine zu geringe Vorkonsolidierungsspannung (120 kPa) aufgebracht als später bei SD.5-2 (170 kPa). Die größeren Setzungen von SD.5 in den ersten Belastungsstufen können darauf zurückgeführt werden, da die Probe eine weichere Konsistenz hatte als SD.5-2. Da die Kurven danach weitestgehend parallel verlaufen, kann angenommen werden, dass mit der gleichen Vorkonsolidierungsspannung der Oedometerversuch zwei beinahe identische Kompressionskurven ergeben hätte.

Tab. 10 Steifemodule aus Oedometer von STK.SD.5 und STK.SD.5-2

Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	
STK.SD.5	Steifemodul E_s [kPa]	Erstbelastung	1703	2130	3396	5831	9434	-
		Zweitbelastung	-	22223	10695	25078	24329	19314
STK.SD.5-2	Steifemodul E_s [kPa]	Erstbelastung	2985	4167	4103	5517	7921	-
		Zweitbelastung	-	17391	16327	21622	23529	13223

Tab. 11 Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, 1. Probenserie Tiefe 5,00 – 5,20 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
STK.SD.5	2,01	1,71	24,50	39,50	0,65	~1,00
STK.SD.5-2	2,06	1,78	21,70	36,70	0,58	~1,00

- **2. Probenserie aus einer Tiefe von 5,00 – 5,20 m**

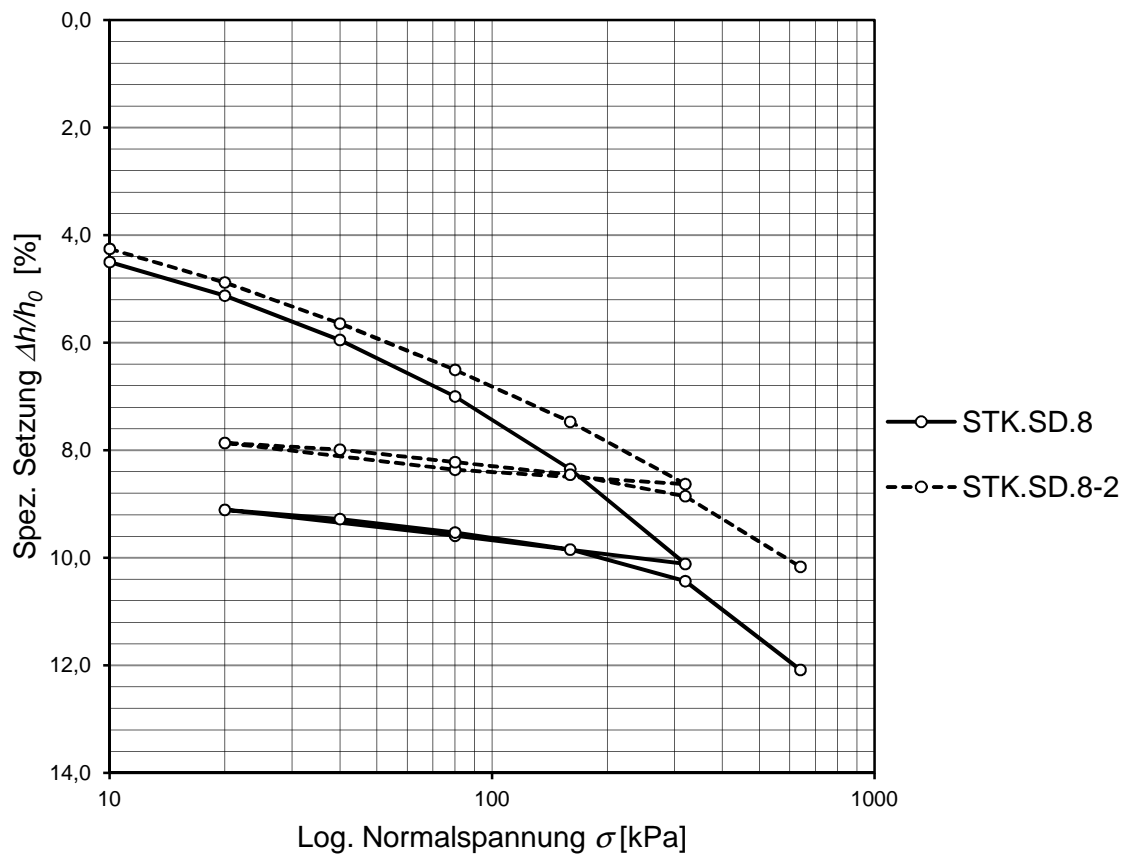


Abb. 29 Kompressionskurven von STK.SD.8 und STK.SD.8-2

Die Probe SD.8 wurde mit einem manuellen Oedometer getestet, SD.8-2 mit einem automatischen. Auch hier sind die Anfangsetzungen beider Proben nahezu gleich, ab der dritten Laststufe wird SD.8 etwas steiler als SD.8-2. Die Entlastung und Zweitbelastung verläuft aber wieder fast parallel.

Die Probe SD.8 wurde noch mit einer geringeren Vorkonsolidierungsspannung (150 kPa) versetzt als die spätere Probe SD.8-2. Darauf kann die Zunahme der Steigung der Kompressionskurve ab der dritten Belastungsstufe von SD.8 zurückgeführt werden. Der Unterschied der Kurvensteigungen kann bei den Steifemodulen ebenfalls erkannt werden. Die Probe SD.8-2 ist ab der dritten Stufe der Erstbelastung erheblich steifer als SD.8.

Tab. 12 Steifemodule aus Oedometer von STK.SD.8 und STK.SD.8-2

Laststufen [kPa]			10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
STK.SD.8	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1905	2837	3156	6387	9065	-
		Zweitbelastung	-	11765	16000	25197	27234	19394
STK.SD.8-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1601	2614	4647	8285	13808	-
		Zweitbelastung	-	16137	17274	34273	39999	24372

Die in Tab. 11 und Tab. 13 angeführten Bodenparameter sind nahezu gleich. Der Unterschied bei den Feuchtdichten kann auf Lufteinschlüsse zwischen Ring und Probe zurückgeführt werden. Die unterschiedlichen Porenzahlen in SD.8 und SD.5 kommen wahrscheinlich durch die zu geringe Vorkonsolidierungsspannung, im Vergleich zu SD.8-2 und SD.5-2, zustande.

Tab. 13 Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian, 2. Probenserie Tiefe 5,00 – 5,20 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
STK.SD.8	2,01	1,84	24,50	39,50	0,65	~1,00
STK.SD.8-2	2,06	1,88	21,50	36,50	0,58	~1,00

4.1.2 Kompressionskurven von Ginau

Aus Ginau wurden aus einer Stechzylinderprobe drei natürliche Oedometerproben herausgeschnitten, die Abschnitte der natürlichen Probe sowie die natürlichen Oedometerproben nach dem Oedometerversuch, wurden verwendet, um drei Probenserien mit jeweils zwei künstlichen Proben herzustellen.

- **1. Probenserie – Tiefe 0,50 m**

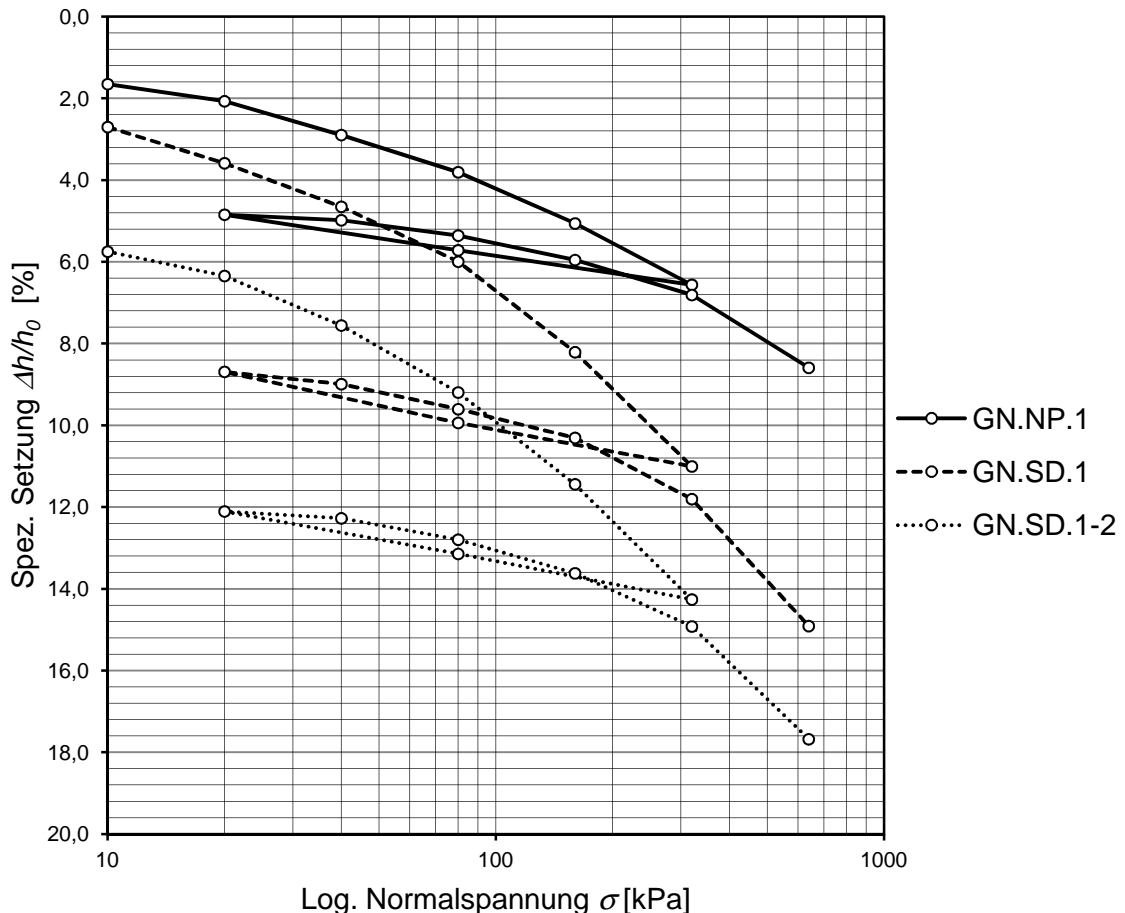


Abb. 30 Kompressionskurven von GN.NP.1, GN.SD.1 und GN.SD.1-2

Die Kurve der natürlichen Probe verläuft etwas flacher als die der künstlichen Probe. Die künstlich hergestellten Proben SD.1 und SD.1-2 haben in fast allen Bereichen der Laststufen die gleiche Krümmung bzw. verlaufen parallel. Ab der vierten Stufe der Zweitbelastung, nähert sich SD.1 immer weiter an SD.1-2 an, dies könnte damit zusammenhängen, dass SD.1 eine etwas geringere Vorkonsolidierungsspannung hatte als SD.1-2. Dies ist auch bei den Steifemodulen der ersten Stufe der Erstbelastung zu sehen. SD.1 hatte eine geringere Steifigkeit nach der Vorkonsolidierung als SD.1-2. Die unterschiedlichen Anfangssetzungen können mit dem Luftraum zwischen Oedometerring und Probe erklärt werden.

Tab. 14 Steifemodule aus Oedometer von GN.NP.1, GN.SD.1 und GN.SD.1-2

		Laststufen [kPa]	10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
GN.NP.1	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	2381	2424	4396	6375	10667	-
		Zweitbelastung	-	14815	10667	13333	18713	17978
GN.SD.1	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	962	1878	2974	3612	5725	-
		Zweitbelastung	-	6667	6504	11429	10667	10306
GN.SD.1-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1681	1653	2439	3563	5674	-
		Zweitbelastung	-	11765	7692	9697	12308	11594

Die Werte der Bodenparameter sind sehr weit voneinander entfernt da dies die erste Versuchsserie aus Ginau war. Das Material wurde mit den gleichen Herstellungsschritten wie St. Kanzian hergestellt und daher musste bei der Probe SD.1, die die erste künstliche Probe aus Ginau war, die Vorkonsolidierungsspannung und der Wassergehalt beim Mischen, angepasst werden.

Tab. 15 Ergebnisse der Bodenparameter Ginau, 1. Probenserie, Tiefe 0,50 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
GN.NP.1	2,00	1,75	19,30	37,20	0,59	0,87
GN.SD.1	1,98	1,70	26,20	41,10	0,70	~1,00
GN.SD.1-2	1,90	1,67	31,60	45,80	0,85	~1,00

- 2. Probenserie – Tiefe 0,50 m

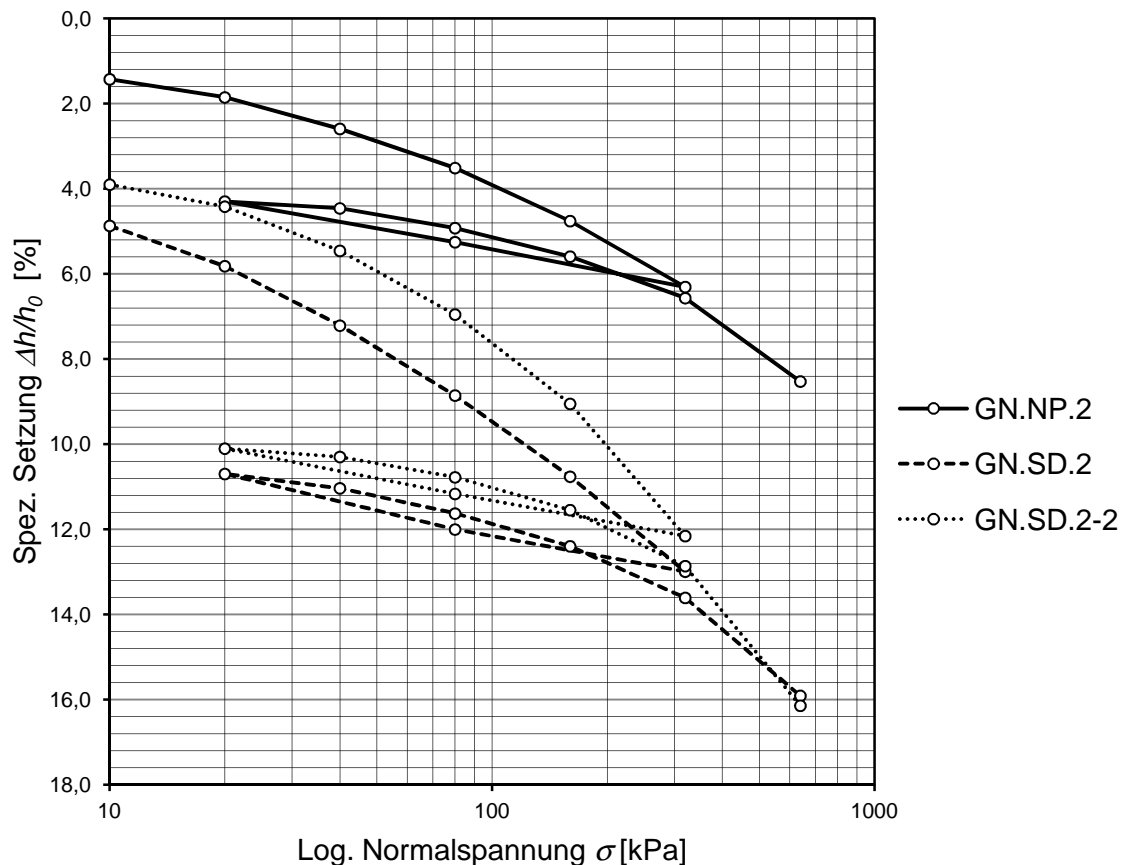


Abb. 31 Kompressionskurven von GN.NP.2, GN.SD.2 und GN.SD.2-2

Die Kompressionskurve der natürlichen Probe NP.2, ist wie bei NP.1 sehr viel flacher als die künstlich hergestellten Proben. Die Kurve von SD.2 hat eine etwas höhere Anfangsetzung als SD.2-2, und verläuft auch anfangs etwas steiler, ehe sich die beiden Kurven bei Stufe vier der Erstbelastung etwas annähern. Die Entlastung der beiden Kurven verläuft annähernd parallel. In der letzten Stufe der Zweitbelastung verläuft SD.2 etwas flacher als SD.2-2 und hat letztlich eine geringere Endsetzung.

Die Anfangssetzungen sind vermutlich auf den nicht gänzlich verfüllten Raum zwischen Oedometerring und Probe zurückzuführen. Die anfangs steilere Kurve von SD.2 kann auf die geringere Vorkonsolidierungsspannung als bei SD.2-2 zurückgeführt werden. Dies kann aus den Steifemodulen der Erstbelastung entnommen werden. Die Probe SD.2 wurde im automatischen Oedometer getestet, SD.2-2 nicht. Diese Tatsache könnte eine Ursache für die unterschiedliche Krümmung der Kompressionskurven sein, weil die Laststufeneinstellung im automatischen Oedometer viel präziser erfolgt als beim manuellen Oedometer.

Tab. 16 Steifemodule aus Oedometer von GN.NP.2, GN.SD.2 und GN.SD.2-2

		Laststufen [kPa]	10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
GN.NP.2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	2353	2703	4348	6426	10323	-
		Zweitbelastung	-	12308	8649	11940	16410	16327
GN.SD.2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1055	1432	2438	4192	7172	-
		Zweitbelastung	-	5970	6738	10388	13207	13903
GN.SD.2-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1942	1923	2676	3810	5153	-
		Zweitbelastung	-	10256	8333	10390	12167	9756

Sowohl die Steifemodule der künstlichen Proben aus Tab. 16, als auch die Bodenparameter aus Tab. 17 liegen mehr oder weniger nahe aneinander. Zwischen der natürlichen Probe und der künstlichen Probe entsteht im Steifemodul ein Unterschied um einen Faktor 1,5 – 2. Die Porenzahl e zwischen der natürlichen und der künstlichen Probe und den künstlichen Proben unterscheidet sich in diesem Fall sehr deutlich.

Tab. 17 Ergebnisse der Bodenparameter Ginau, 2. Probenserie, Tiefe 0,50 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
GN.NP.2	2,02	1,77	19,30	36,60	0,58	0,89
GN.SD.2	1,91	1,62	31,20	45,50	0,83	~1,00
GN.SD.2-2	1,93	1,66	30,10	44,60	0,80	~1,00

- 3. Probenserie - Tiefe 0,50 m

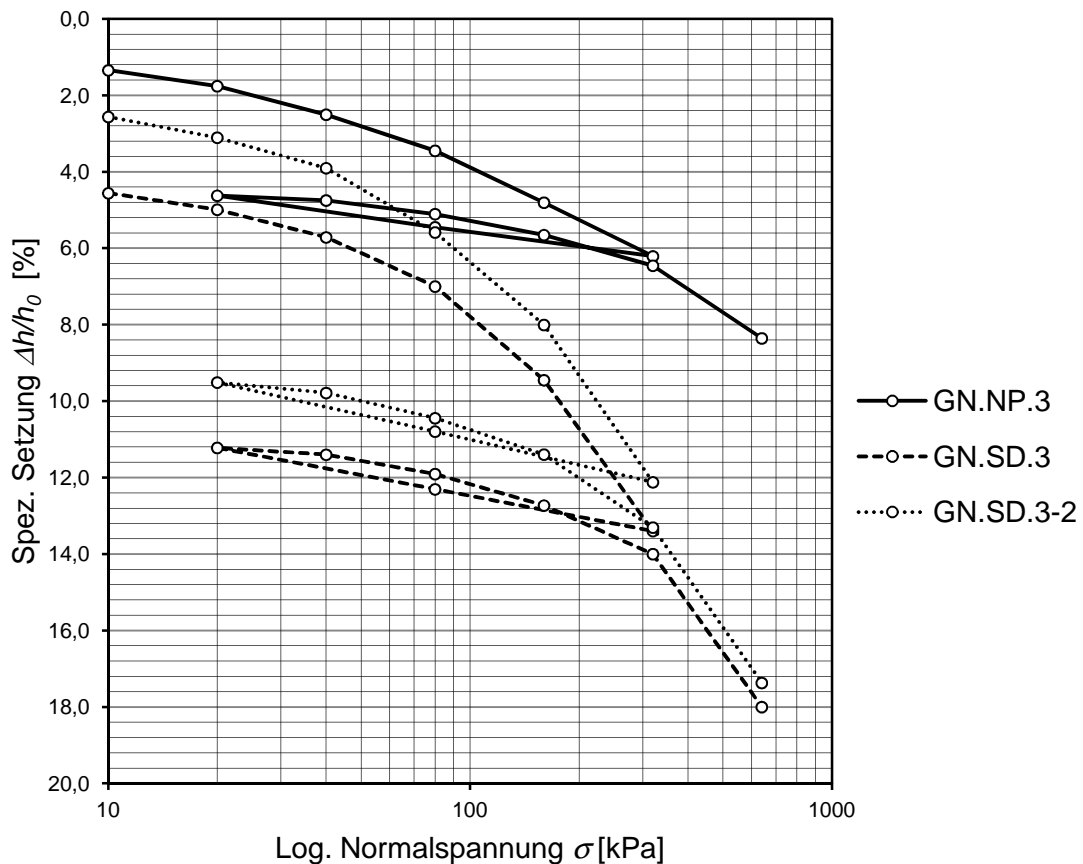


Abb. 32 Kompressionskurven von GN.NP.3, GN.SD.3 und GN.SD.3-2

Die Kompressionskurve der natürlichen Probe NP.3 ist wie bei NP.1 und NP.2 sehr viel flacher als die künstlich hergestellten Proben. Die künstlichen Proben SD.3 und SD.3-2 wurden beide mit der gleichen Vorkonsolidierungsspannung belastet und in einem manuellen Oedometer getestet. Die ersten beiden Belastungsstufen der Erstbelastung der künstlichen Proben verlaufen parallel, in der dritten Stufe verzeichnet SD.3-2 mehr Setzung als SD.3. Der weitere Verlauf der Erstbelastung verläuft annähernd parallel, dies hält bis zur letzten Stufe der Zweitbelastung an.

Ein Grund für die höhere Setzung von SD.3-2, im Vergleich zu SD.3, in der dritten Belastungsstufe könnte es sein, dass manuelle Oedometer verwendet wurden. Eine geringe Abweichung der Belastung von beispielweise $1/10 \text{ bar} \cong 10 \text{ kN/m}^2$, kann große Unterschiede in der Kurve hervorrufen. Die künstlichen Proben der zweiten und dritten Serie sind einander von der Krümmung der Kurven sehr ähnlich, die erste Serie hat sich etwas anders verhalten da die Vorkonsolidierungsphase bei SD.1 am neuen Probenmaterial noch angepasst werden musste.

Tab. 18 Steifemodule aus Oedometer von GN.NP.3, GN.SD.3 und GN.SD.3-2

		Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
GN.NP.3	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung		2410	2685	4233	5904	11388	-
		Zweitbelastung		-	16000	11268	14545	20000	16842
GN.SD.3	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung		2326	2759	3113	3265	4056	-
		Zweitbelastung		-	11111	7921	9697	11073	9552
GN.SD.3-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung		1852	2500	2381	3306	3888	-
		Zweitbelastung		-	7273	6061	8421	8377	7872

Die Bodenparameter der natürlichen Proben NP.1, NP.2 und NP.3 in dieser Versuchsserie sind nahezu gleich. Die Parameter der künstlichen Proben SD.3 und SD.3-2 weichen allerdings etwas von einander ab. Vor allem die Porenzahl e weist einen sehr großen Unterschied auf. Dies könnte auch auf Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von Wassergehalt w und Feuchtdichte ρ_F zurückgeführt werden.

Tab. 19 Ergebnisse der Bodenparameter Ginau, 3. Probenserie, Tiefe 0,50 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
GN.NP.3	2,03	1,77	19,3	36,4	0,57	0,90
GN.SD.3	1,92	1,66	30,3	44,7	0,81	~1,00
GN.SD.3-2	1,88	1,64	34,0	47,6	0,91	~1,00

In Abb. 33 sind die Kompressionskurven der drei natürlichen Proben in einem Diagramm abgebildet. Alle künstlich wiederhergestellten Proben aus Ginau sind in Abb. 34 dargestellt. Diese Darstellung dient dazu, um die Probenserien untereinander besser vergleichen zu können. Der Vergleich der natürlichen mit den künstlichen Proben zeigt, dass die natürlichen Proben „steifer“ als die künstlichen Proben sind.

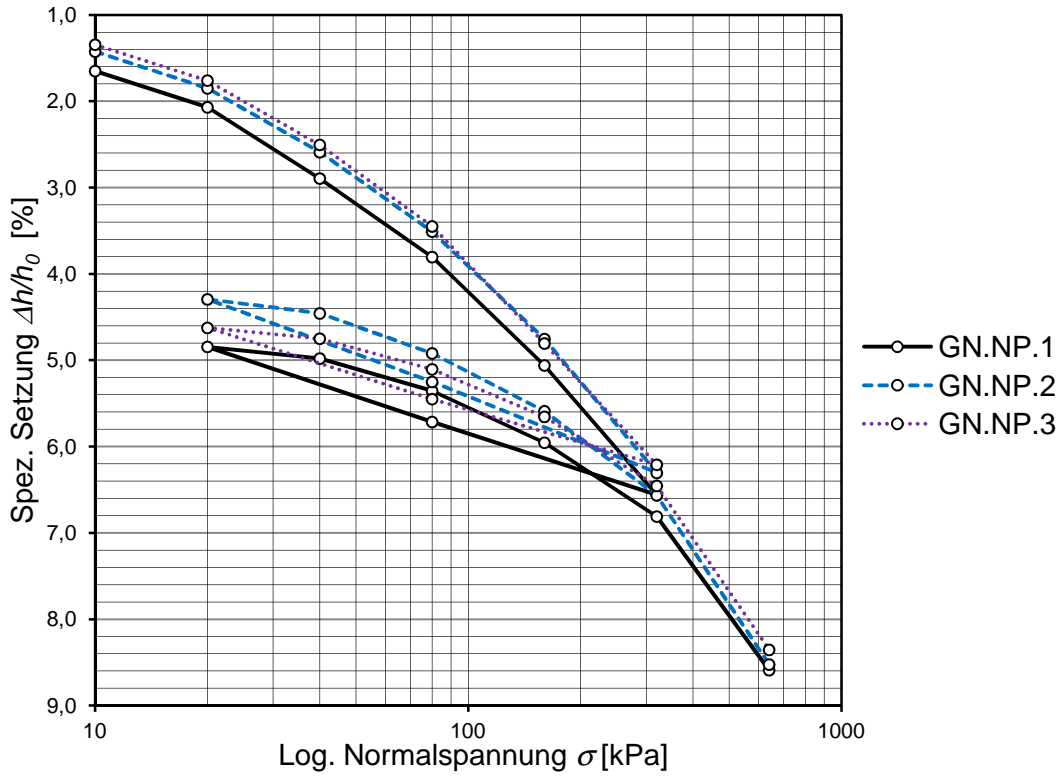


Abb. 33 Kompressionskurven der natürlichen Proben aus Ginau

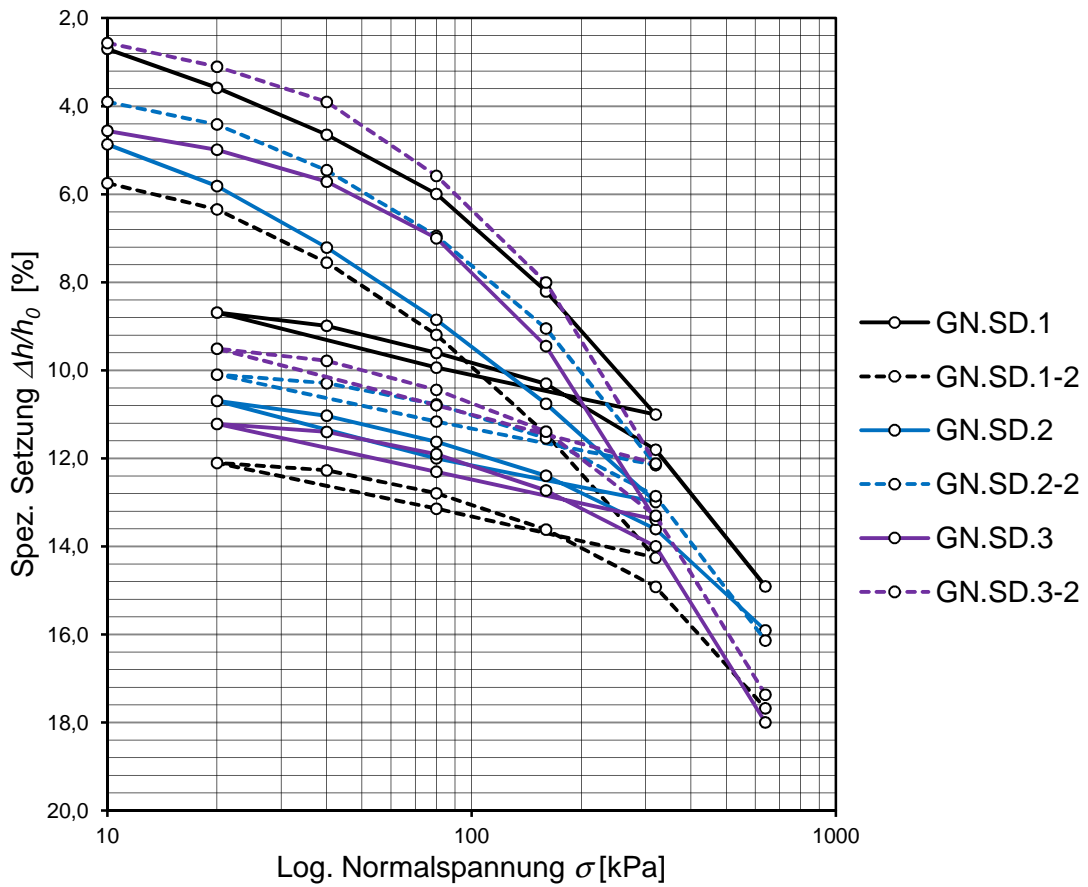


Abb. 34 Kompressionskurven der künstlich wiederhergestellten Proben aus Ginau

4.1.3 Kompressionskurven Salzburg/Riedenburg

Aus dem Salzburger Stadtteil Riedenburg standen noch Proben einer älteren Kernbohrung zur Verfügung. Hier wurden drei natürliche Proben entnommen und wiederum drei Serien mit jeweils zwei künstlichen Proben durchgeführt.

- **1.Probenserie – Tiefe 8,60 – 9,00 m**

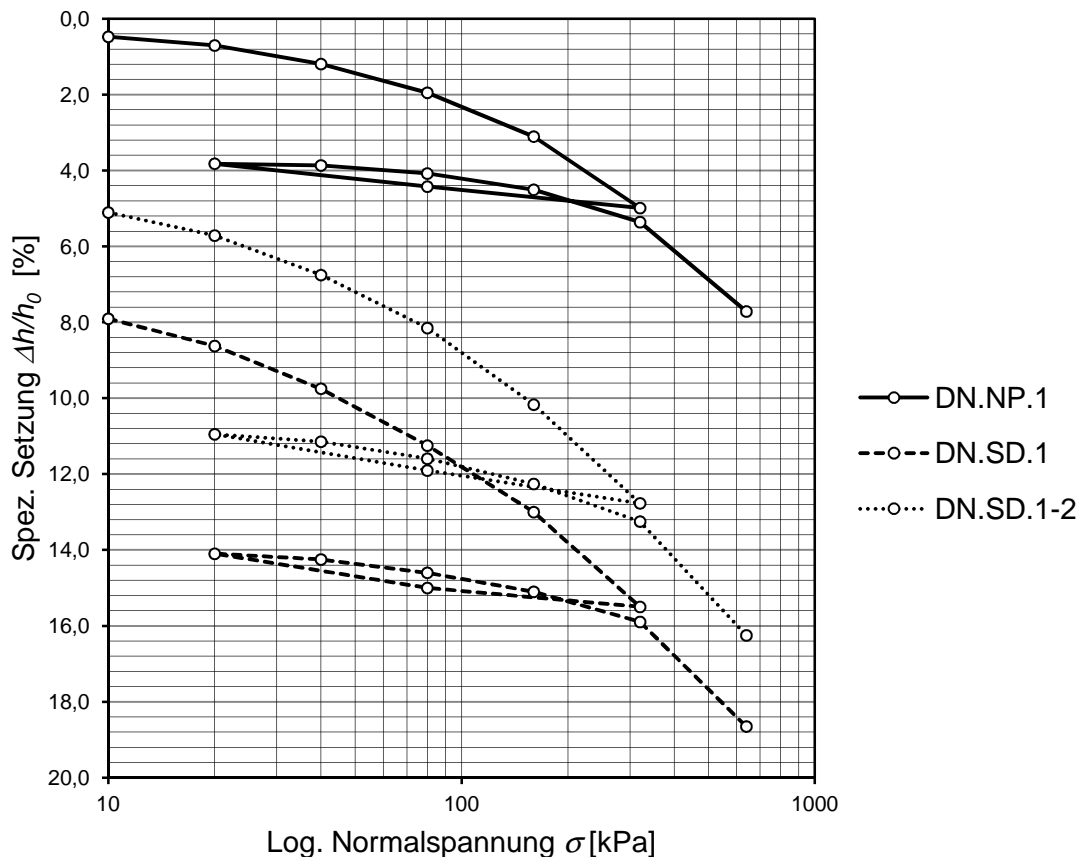


Abb. 35 Kompressionskurven von DN.NP.1, DN.SD.1 und DN.SD.1-2

Die natürliche Probe NP.1 hat eine sehr geringe Anfangssetzung, und die Kompressionskurve ist sehr flach. Die beiden künstlichen Proben SD.1 und SD.1-2 haben, bis auf die höhere Anfangssetzung von SD.1, eine annähernd gleich gekrümmte Kurve bis zum Ende der dritten Belastungsstufe der Erstbelastung. Danach nähert sich die Kurve von SD.1-2, bis zum Ende der letzten Stufe der Wiederbelastung, immer weiter an SD.1 an.

Der Grund für die geringe Anfangssetzung von NP.1 ist es, dass es eine ältere, bereits etwas angetrocknete Probe war. Daher auch die höheren Steifemodule dieser Probe. Die beiden künstlichen Proben SD.1 und SD.1-2 haben allerdings annähernd gleich große Steifemodule in den einzelnen Belastungsstufen (siehe Tab. 20). Die Differenz

der Anfangsetzung der beiden künstlichen Proben kommt daher, dass SD.1 mit einer wesentlich geringeren Vorkonsolidierungsspannung belastet wurde als SD.1-2. Dadurch war die Konsistenz von SD.1 erheblich weicher als die von SD.1-2. Daher konnte nicht das exakt gleiche Volumen der Probe in den Oedometerring eingebracht werden, da die Probe viel zu plastisch war.

Tab. 20 Steifemodule aus Oedometer von DN.NP.1, DN.SD.1 und DN.SD.1-2

Laststufen [kPa]			10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
DN.NP.1	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	4348	4082	5298	6926	8488	-
		Zweitbelastung	-	44444	18605	18824	18713	13588
DN.SD.1	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1389	1778	2667	4571	6400	-
		Zweitbelastung	-	13333	11429	16000	20126	11615
DN.SD.1-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1639	1923	2867	3960	6154	-
		Zweitbelastung	-	10256	8889	12030	16162	10667

Der Grund für die Unterschiede bei den Bodenparametern in Tab. 21 der natürlichen im Vergleich zu den künstlichen Proben ist der, dass die natürliche Probe bereits älter und etwas ausgetrocknet war, wie man am Wassergehalt erkennen kann. Der Unterschied der beiden künstlichen Proben hält sich bei allen Parametern in Grenzen. Zu erwähnen wäre, dass in der Literatur wie in Kapitel 3.1 beschrieben, die Porenzahl der natürlichen Probe im Allgemeinen größer ist als die der künstlich hergestellten Probe, was hier aufgrund der teilweisen Austrocknung der natürlichen Probe nicht der Fall ist.

Tab. 21 Ergebnisse der Bodenparameter, 1. Probenserie, Tiefe 8,60 – 9,00 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
DN.NP.1	1,94	1,63	21,1	40,0	0,67	0,84
DN.SD.1	1,89	1,57	32,9	46,7	0,88	~1,00
DN.SD.1-2	1,90	1,58	32,2	46,3	0,86	~1,00

- 2.Probenserie – Tiefe 8,60 – 9,00 m

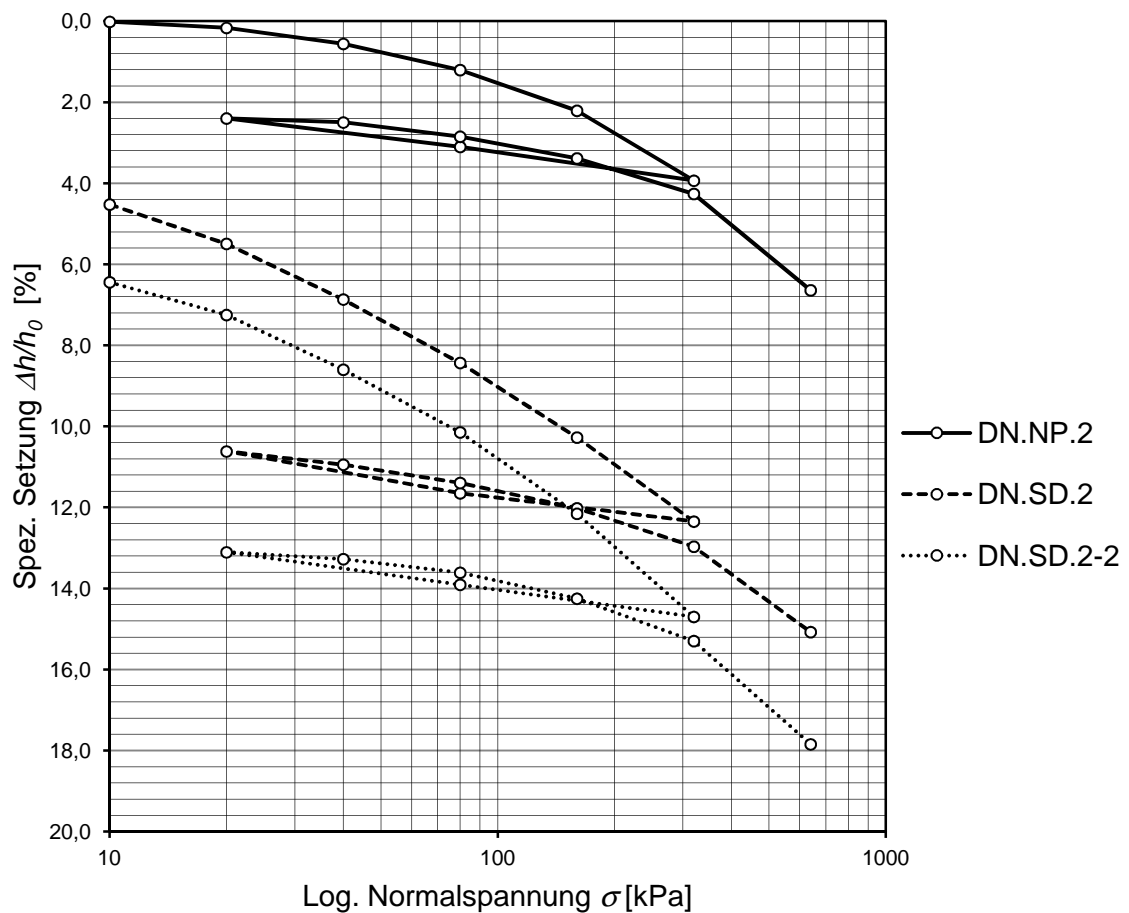


Abb. 36 Kompressionskurven von DN.NP.2, DN.SD.2 und DN.SD.2-2

Die natürliche Probe NP.2 hat eine sehr geringe Anfangssetzung und auch der Verlauf der Kompressionskurve ist sehr flach. Die beiden künstlich hergestellten Proben SD.2 und SD.2-2 sind, abgesehen von den unterschiedlichen Anfangssetzungen, bis zur vierten Stufe der Erstbelastung annähernd parallel. Vor der Entlastung erfährt SD.2-2 eine etwas höhere Setzung als SD.1, daher fällt die Kurve in diesem Bereich etwas steiler ab. Die Entlastung selbst und die Zweitbelastung verlaufen annähernd parallel.

Die unterschiedlichen Anfangssetzungen stammen möglicherweise daher, dass dieses Bodenmaterial je mehr es vor dem Einbau in den Oedometer gestört wird, z.B. durch drücken und schneiden, desto plastischer wird es. Dies macht es beinahe unmöglich, das gesamte Volumen des Odometerringes damit auszufüllen. Der Unterschied der Anfangs- und Endsetzungen von SD.2 und SD.2-2 ist nicht sehr groß, kann aber darauf zurückgeführt werden, dass SD.2 im automatischen und SD.2-2 im manuellen Oedometer getestet wurde. Auch die Steifemodule der beiden Proben weisen nur geringe Unterschiede auf.

Tab. 22 Steifemodule aus Oedometer von DN.NP.2, DN.SD.2 und DN.SD.2-2

Laststufen [kPa]			10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
DN.NP.2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	6667	5063	6202	7960	9275	-
		Zweitbelastung	-	20513	11348	14953	18286	13445
DN.SD.2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1031	1457	2556	4343	7713	-
		Zweitbelastung	-	6127	8889	12759	16897	15189
DN.SD.2-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung	1235	1481	2589	3980	6287	-
		Zweitbelastung	-	11765	11940	12500	15311	12549

Durch das unterschiedlich plastische Verhalten der Probe nach der Vorkonsolidierung und vor dem Einbau in den Oedometer, sind auch Unterschiede bei der Feuchtdichte ρ_F zu erkennen. Da die Porenzahl e von Feuchtdichte ρ_F und Wassergehalt w abhängig ist, zieht sich der Unterschied der beiden künstlichen Proben durch.

Tab. 23 Ergebnisse der Bodenparameter, 2. Probenserie, Tiefe 8,60 – 9,00 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
DN.NP.2	1,97	1,64	21,10	39,20	0,64	0,87
DN.SD.2	1,86	1,55	35,10	48,40	0,94	~1,00
DN.SD.2-2	1,90	1,62	32,10	46,10	0,86	~1,00

- 3.Probenserie – Tiefe 8,60 – 9,00 m

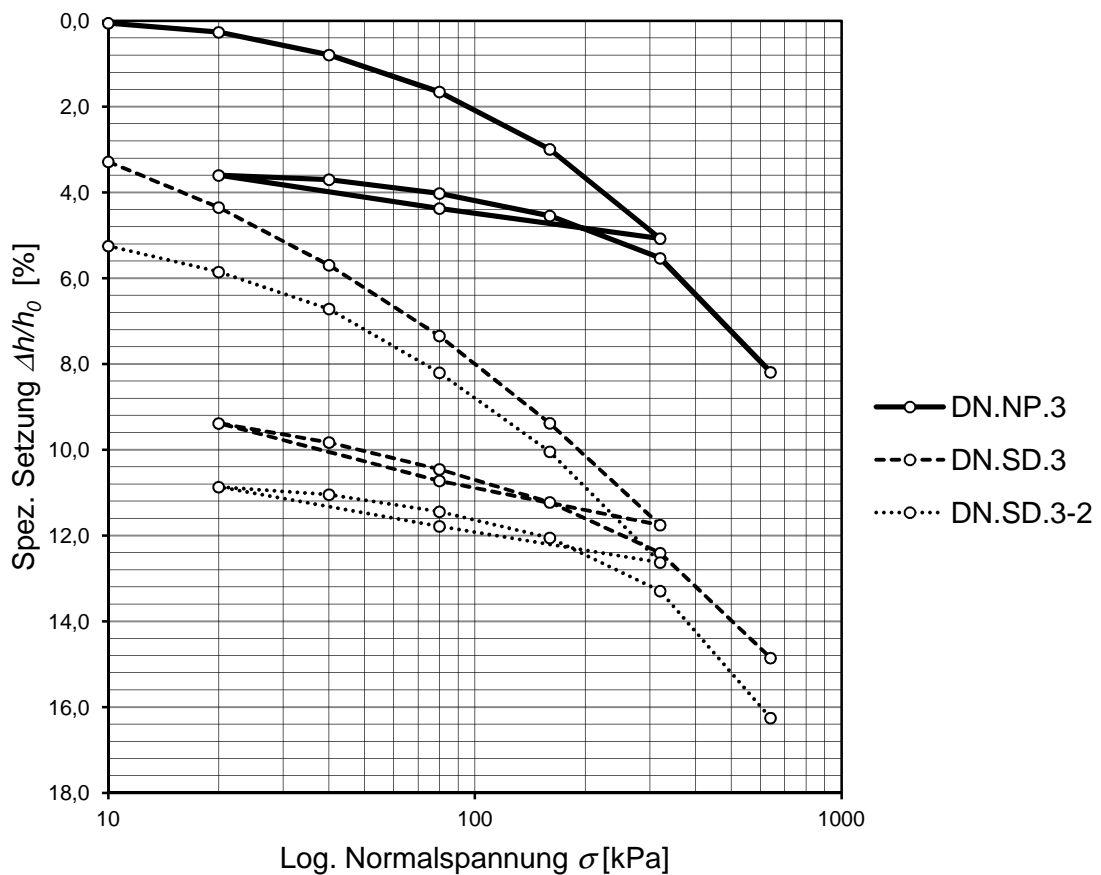


Abb. 37 Kompressionskurven von DN.NP.3, DN.SD.3 und DN.SD.3-2

Die natürliche Probe NP.1 hat wie NP.2 und NP.3 eine sehr geringe Anfangssetzung und der Kurvenverlauf ist im Vergleich zu den künstlichen Proben flacher. Die Kompressionskurven der künstlichen Proben SD.3 und SD.3-2 nähern sich bis zur vierten Stufe der Erstbelastung aneinander an, entfernen sich danach aber wieder etwas von einander.

Der Grund für die geringen Anfangsetzungen von NP.3 ist gleich wie bei den vorher beschriebenen Proben NP.1 und NP.2. Durch die höhere Steifigkeit der natürlichen Probe, ist auch die Endsetzung viel kleiner als bei den künstlichen Proben. Die anfänglich geringere Neigung der Kompressionskurve (steiferes Verhalten) von SD.3-2 ist darauf zurückzuführen, dass die Vorkonsolidierungsspannung größer war als bei SD.3. Ein weiterer Grund für die geringen Unterschiede in den Kurven könnte sein, dass SD.3 im automatischen und SD.3-2 im manuellen Oedometer getestet wurden. Beim manuellen Oedometer können Ungenauigkeiten bei der Einstellung der Laststufen durch Druckluft entstehen. Diese Ungenauigkeiten treten beim automatischen Oedometer nicht auf.

Tab. 24 Steifemodule aus Oedometer von DN.NP.3, DN.SD.3 und DN.SD.3-2

		Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640
DN.NP.3	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung		4762	3774	4651	5970	7692	-
		Zweitbelastung		-	20513	12308	15311	16203	12041
DN.SD.3	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung		940	1485	2425	3934	6735	-
		Zweitbelastung		-	4515	6377	10388	13529	13077
DN.SD.3-2	Steifemodul E_{oed} [kPa]	Erstbelastung		1653	2326	2685	4348	6190	-
		Zweitbelastung		-	11429	10000	13115	12903	10811

Die Bodenparameter der natürlichen Proben NP.1, NP.2 und NP.3 sind annähernd die gleichen. Bei dieser Versuchsserie stimmen auch die Parameter der künstlichen Proben SD.3 und SD.3-2 sehr gut überein. Es sind nur minimale Unterschiede bei Porenzahl und Wassergehalt zu sehen.

Tab. 25 Ergebnisse der Bodenparameter, 3. Probenserie, Tiefe 8,60 – 9,00 m

Probe	ρ_F [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e	S_r
DN.NP.3	1,90	1,58	21,1	41,2	0,70	0,80
DN.SD.3	1,87	1,52	34,7	48,1	0,93	~1,00
DN.SD.3-2	1,87	1,56	34,4	47,9	0,92	~1,00

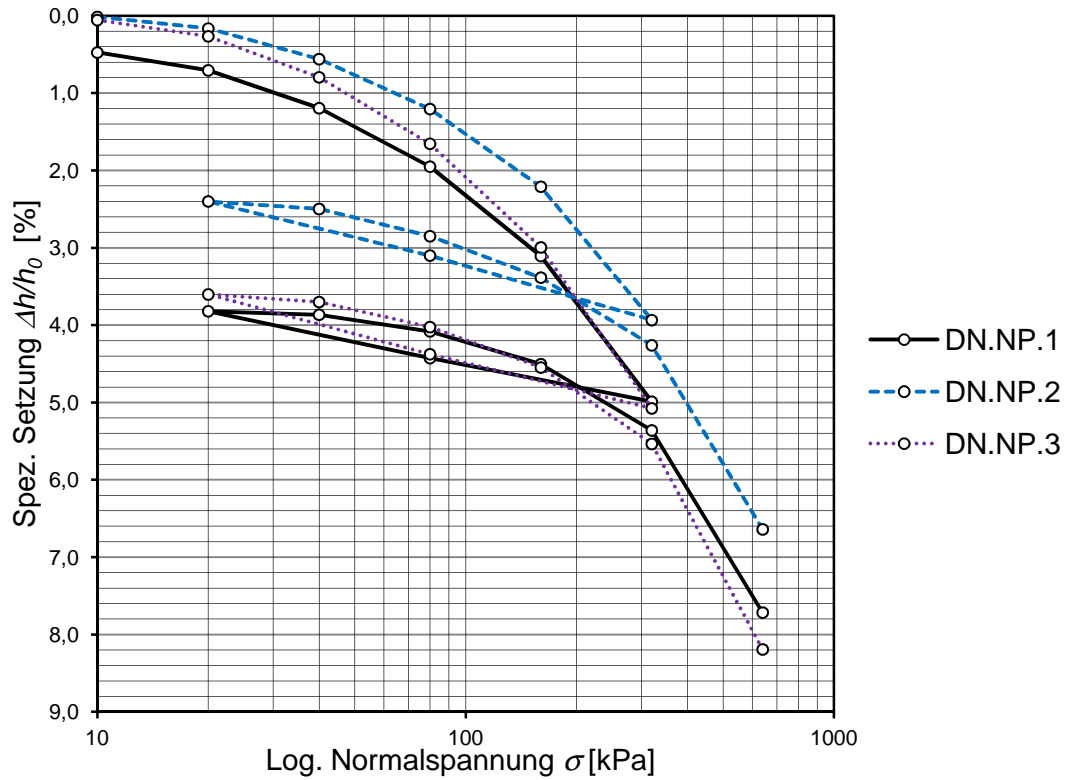


Abb. 38 Kompressionskurven der natürlichen Proben aus Salzburg/Riedenburg

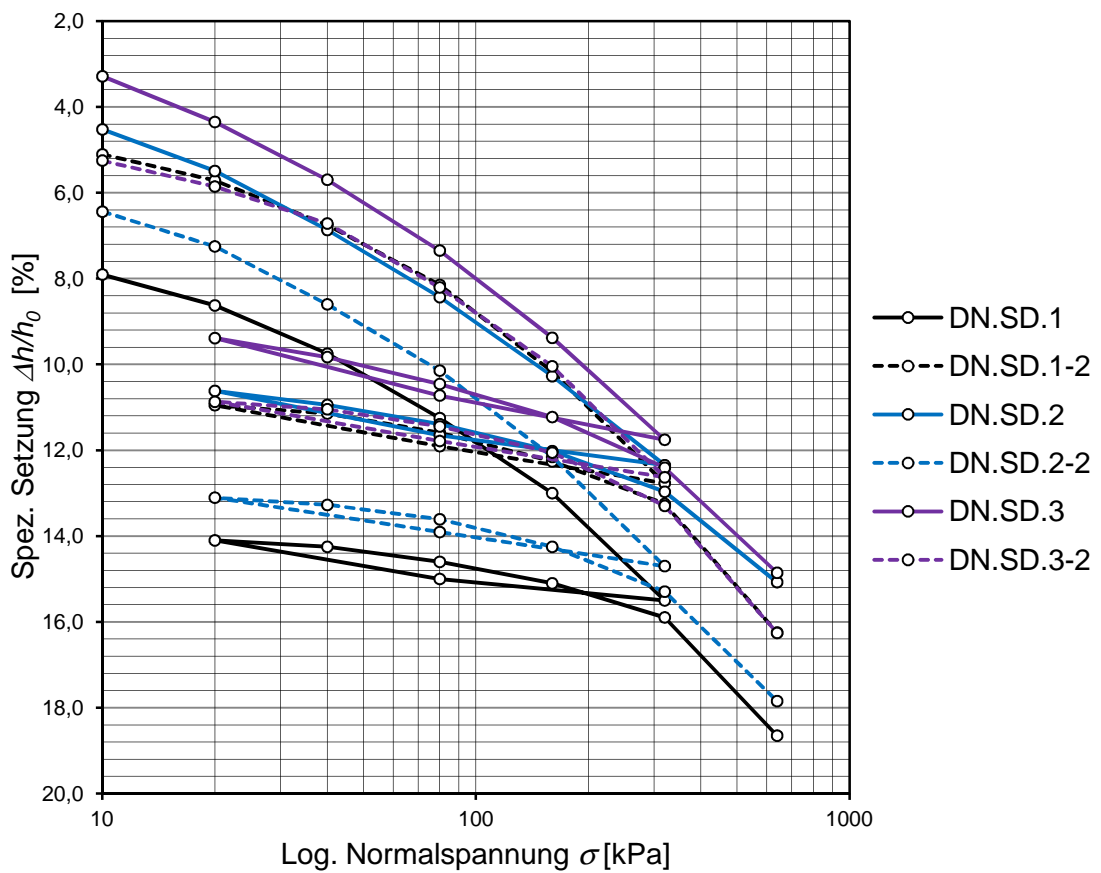


Abb. 39 Kompressionskurven der künstlichen Proben aus Salzburg/Riedenburg

4.2 Querschnittsbilder

Von den drei verschiedenen Bodenmaterialien, die für die Sedimentationsversuche verwendet wurden, sind sowohl die getrockneten natürlichen, als auch die künstlichen hergestellten Proben in der Hälfte geteilt worden.

In Abb. 40 sind die Querschnitte zweier Proben aus St. Kanzian, oben die natürliche und unten die künstliche Probe. Es sind sehr homogene Proben, sowohl im natürlichen, als auch im künstlich hergestellten Zustand.



Abb. 40 Querschnittsbild aus St.Kanzian, Oben: natürlich, Unten: künstlich

Aus Ginau wurden zwei künstlich hergestellte Probenquerschnitte miteinander verglichen, wie in Abb. 41 zu sehen ist. Es ist gut zu erkennen, dass in dieser Bodenprobe die etwas größeren Körner vorhanden sind, als in der von St. Kanzian. Die Kornverteilungen werden in Kapitel 4.3 dargestellt.

In Abb. 42 wird aus Salzburg/Riedenburg eine natürliche mit einer künstlichen Probe verglichen. Auch hier ist eine sehr homogene Struktur zu erkennen. Die Querschnittsbruchflächen ähneln einander, bis auf die Lufteinschlüsse der natürlichen Probe, sehr.



Abb. 41 Querschnittsbild aus Ginau von zwei künstlichen Proben



Abb. 42 Querschnittsbild aus Salzburg/Riedenburg, Oben: natürlich, Unten: künstlich

4.3 Korngrößenverteilungen

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob sich die Bodenteilchen in der Suspension unterschiedlich absetzen, wurden von der unteren und oberen Hälfte ausgewählter Proben Korngrößenverteilungen gemacht, um dies besser zu veranschaulichen. In Abb. 43 ist die Korngrößenverteilung der Probe SD.5 aus St. Kanzian dargestellt. Die Abweichungen der oberen und unteren Verteilung sind minimal, eine geringe Abweichung ist nur in der Linie der unteren Probenhälfte zu erkennen. Dieser Unterschied im Grobschluffbereich zeigt uns, dass sich hier gröbere Bodenteilchen etwas mehr absetzen.

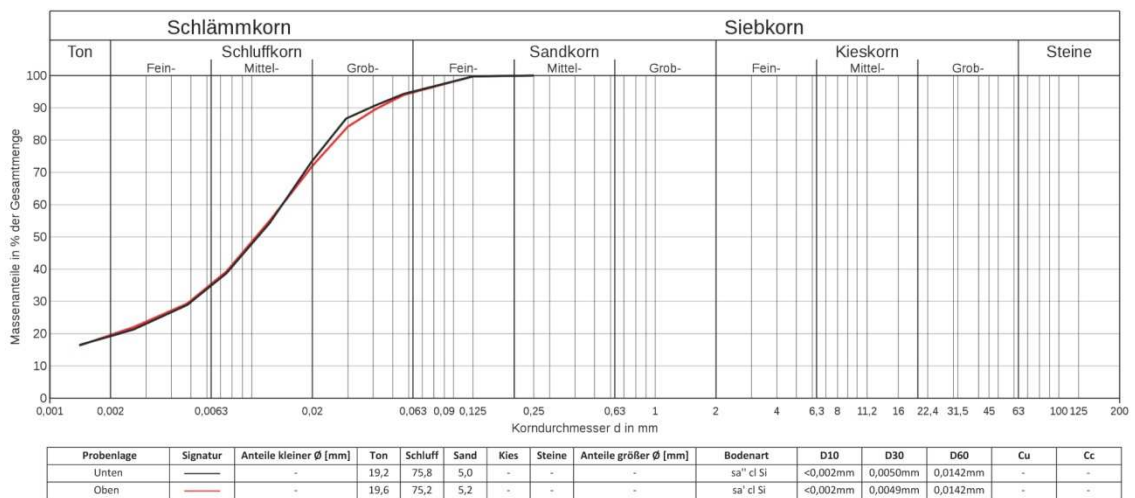


Abb. 43 Korngrößenverteilung Oben-Unten aus St. Kanzian

Die Korngrößenverteilung der Probe SD.2-2 aus Ginau weist, ähnlich wie bei St. Kanzian, nur eine geringe Unstätigkeit der Verteilung im Grob- und Mittelschluffbereich auf.



Abb. 44 Korngrößenverteilung Oben-Unten aus Ginau

Bei der Korngrößenverteilung der Probe SD.2-2 aus Riedenburg in Abb. 45 ist gut zu erkennen, dass sich die Verteilungen der oberen und unteren Probenhälfte kaum unterscheiden. Die Verteilung der Bodenteilchen über die gesamte Probe ist sehr homogen. Im Vergleich zu den anderen zwei Proben aus St. Kanzian und Ginau, hat diese Probe hier nahezu keine Sandanteile, dafür aber einen hohen Schluff- und Tonanteil.

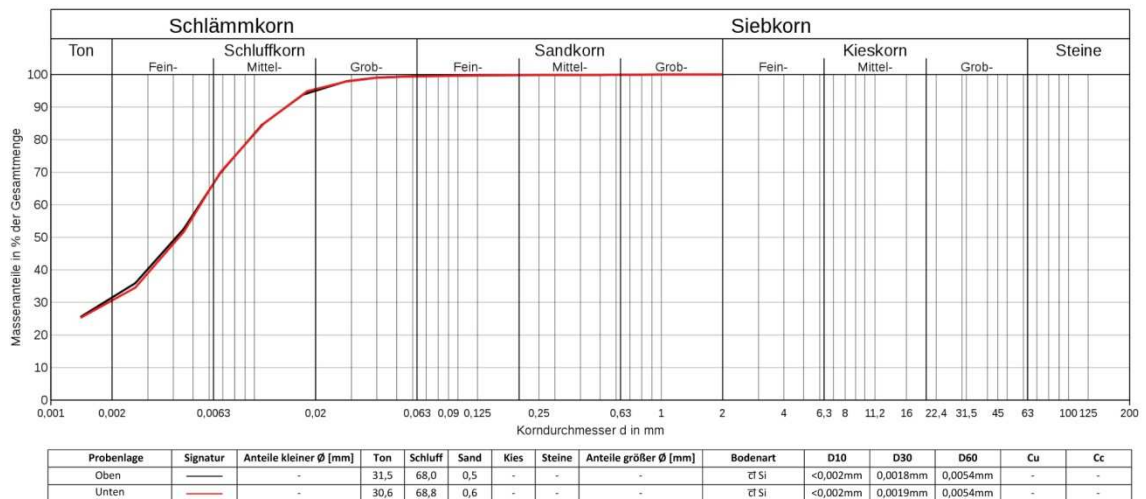


Abb. 45 Korngrößenverteilung Oben-Unten aus Salzburg/Riedenburg

In Abb. 46 werden die Korngrößenverteilungen des Probenmaterials von den drei Herkunftsorten dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass das Material aus Ginau den größten Anteil an Sandkorn besitzt, dafür aber weniger Schluffanteil als die beiden anderen Materialien. In St. Kanzian ist der Anteil von Schluff mit 75,2 % am größten. Der Tonanteil von Riedenburg und Ginau ist um einiges höher als der von St. Kanzian.

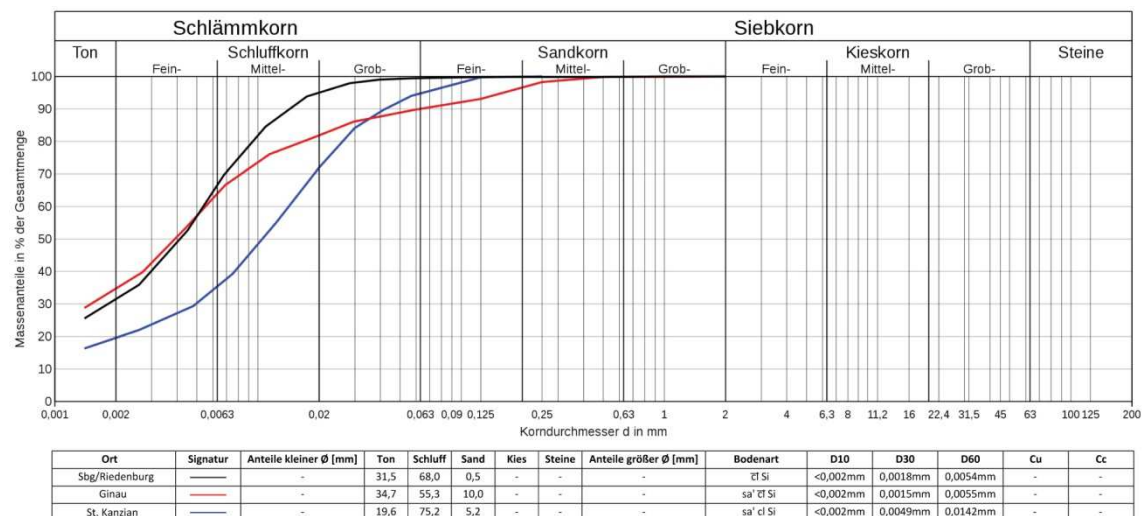


Abb. 46 Korngrößenverteilung von St. Kanzian, Ginau und Salzburg/Riedenburg

4.4 Laborergebnisse aus St. Kanzian

Das Labor für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz hat am Probenmaterials der Kernbohrung aus St. Kanzian noch weitere Untersuchungen durchgeführt. Es wurden in mehreren Tiefen noch weitere Bodenparameter ermittelt und in der Tiefe von 5,00 – 5,20 m ein Triaxialversuch durchgeführt (Geotechnisches Labor der TU Graz, Mai 2015).

4.4.1 Bodenparameter

Um den richtigen Wassergehalt, zur Herstellung einer Suspension des Bodenmaterials für künstliche Proben, heraus zu finden, wird laut Literatur meist der Wassergehalt der Fließgrenze w_L des Bodens als Basis herangezogen (Watabe et al. 2015). Hier wird das 1,5 bis 2-fache des Wassergehalts der Fließgrenze w_L beigegeben um eine verarbeitbare Suspension zu erhalten. Anzumerken ist, dass diese Werte an Tonböden untersucht wurden.

Die in Abb. 47 angeführten Ergebnisse des Wassergehalts der Fließgrenze w_L in einer Tiefe von 3,75 – 3,80 m betragen 32,0 %. Wie zuvor erwähnt, werden die Wassergehälter der Fließgrenze w_L verdoppelt ($2 w_L = 64$ %) und dann herangezogen, um damit die Suspension für die künstlichen Proben zu mischen. Für die hier künstlich wiederhergestellten Proben wurde unter anderem Material aus 3,80 – 4,00 m Tiefe verwendet. Der in Tab. 3 angegebene Wassergehalt, der für Proben aus St. Kanzian verwendet wurde, beträgt 70 %. Daher kann gesagt werden, dass die Werte aus der Literatur annähernd den hier verwendeten entsprechen.

Labornummer				19131	19132	19133	19134
Bezeichnung				1	2	3	4
Bodenart	ÖN EN 13688-1 bzw. ONR 24400-1			gr ⁺ sa ⁺ cl Si	sa ⁺ cl Si	sa ⁺ cl Si	sa ⁺ c ⁻ Si
Tiefe		t	m	2,47-2,52	2,77-2,90	3,15-3,20	3,75-3,80
Korndichte	ÖN B 4413	ρ_s	g/cm ³				
Dichte des feuchten Bodens	ÖN B 4414-1 oder ÖN B 4414-2	ρ	g/cm ³				
Dichte des trockenen Bodens		ρ_d	g/cm ³				
Porenanteil		n	%				
Porenzahl		e	1				
Wassergehalt	ÖN B 4410	w	%	33,2	28,2	28,2	26,7
Sättigungsgrad		S_r	1,%				
Fließgrenze	ÖN B 4411	w_L	%	31,2	32,2	33,1	32,0
Ausrollgrenze		w_P	%	21	21	22	21
Bildsamkeitszahl		I_P	%	10,2	11,2	11,1	11,0
Konsistenzzahl		I_C	[-]	-0,2	0,4	0,4	0,5

Abb. 47 Untersuchungsergebnisse St.Kanzian

4.4.2 Triaxialversuch

Ein Multistage Triaxialversuch wurde an Probenmaterial aus 5,00 – bis 5,20 m durchgeführt. Durch diesen Versuch erhält man zusätzlich den Reibungswinkel φ des Bodens.

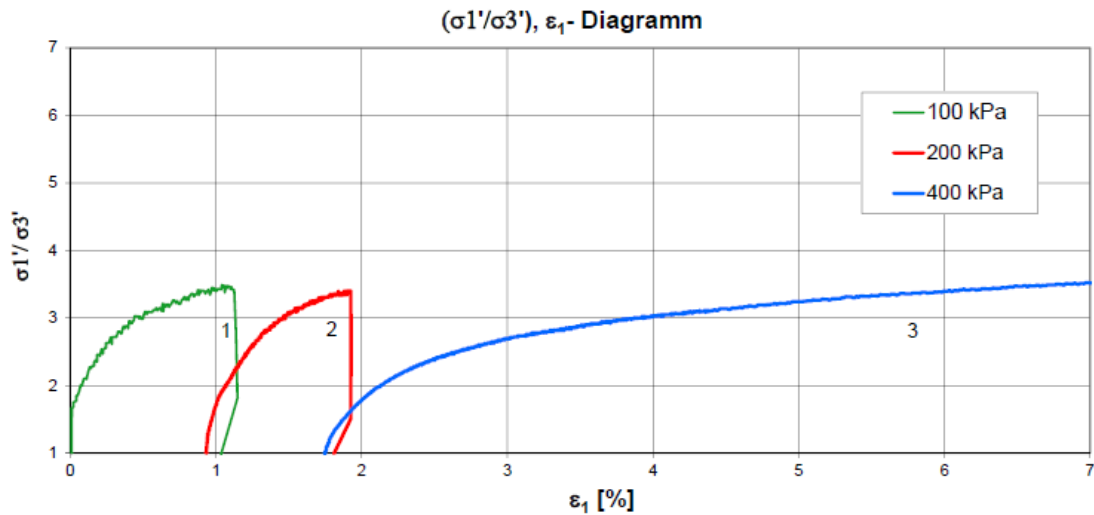


Abb. 48 Ergebnis Triaxialversuch St. Kanzian

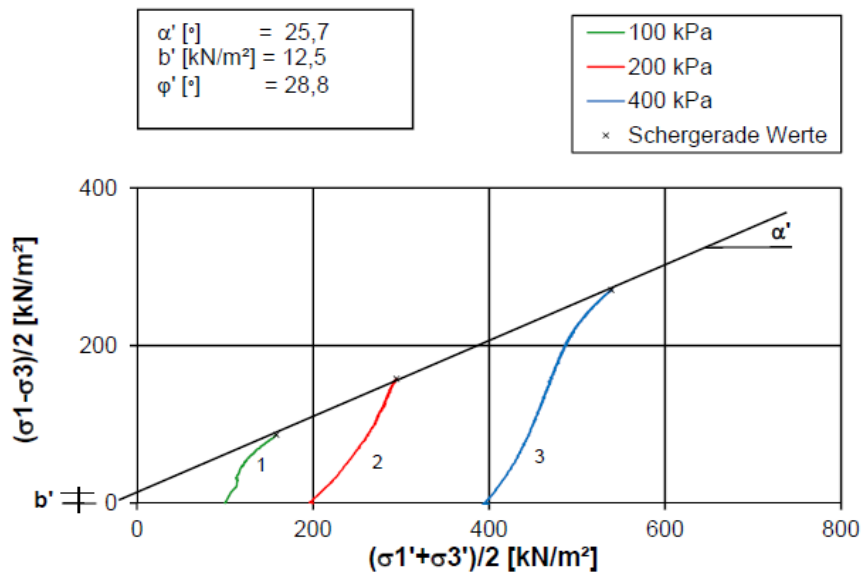


Abb. 49 Ergebnis Triaxialversuch St. Kanzian

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Anzahl der vielen wiederhergestellten Bodenproben durch künstliche Sedimentation, wurde einiges an Wissen über die vielen Besonderheiten bei der Herstellung gewonnen. Der Versuchsablauf zur Herstellung der Proben ist hier soweit ausgetestet und angepasst worden, dass er ohne Probleme für weitere Versuche verwendet werden kann. Der Wassergehalt ist abhängig von den Konsistenzgrenzen des jeweiligen Bodens und muss zu Beginn einer Versuchsreihe angepasst werden. Sowohl die Ergebnisse der Kompressionskurven, als auch die Ergebnisse der Bodenparameter die mit den Versuchen erreicht wurden, können sehr gut mit Erfahrungen und Anhaltspunkten von Watabe et al. (2015) verglichen werden.

Für weitere Versuche an feinkörnigen Böden mittels Wiederherstellung durch künstliche Sedimentation sollte auf einige Details geachtet werden bzw. sind zusätzliche Aufzeichnungen vorzunehmen:

- Zeit-Setzungslinie während der Vorkonsolidierung, um den mittleren Konsolidierungsgrad U_m errechnen zu können
- Vorkonsolidierungsspannung muss an den Überlagerungsdruck der natürlichen Probe angepasst werden – Methode von Casagrande aus der ÖNORM EN ISO 17892-5 (2014)
- Suspensionsvolumen sollte nach der Vorkonsolidierung dem Oedometerringvolumen entsprechen – zuschneiden und stören der Probe entfällt – große Anfangssetzungen im Oedometerversuch könnten verhindert werden
- mehrere Ent- und Wiederbelastungen der künstlichen Probe vor dem Oedometerversuch sollten vermieden werden
- Bei den einzelnen Probenserien sollten für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse entweder manuelle oder automatische Oedometer verwendet werden. Optimal wäre ausschließlich die Verwendung von automatischen Oedometern.

Was festgehalten werden kann, ist, dass es noch unzählige weitere Versuche benötigt, die mit diesem Versuchsablauf ganz exakt durchgeführt werden müssen, um mit künstlich wiederhergestellten Proben noch näher an die Steifigkeiten und Bodenparameter der natürlichen Proben heranzukommen.

6 Literatur

- Carraro, J.A.H., Prezzi, M. (2008)
A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, No. 1
- Geotechnisches Labor der TU Graz (Mai 2015)
Bodenmechanische Untersuchungsergebnisse, Projektnummer 139
- KNF-Neuberger (2015)
<http://www.knf.de>, Vakuumpumpe der Typenreihe Laboport N 86 K_.18
- Kuerbis, R., Vaid, Y. P. (1988)
Sand Sample preparation – The Slurry Deposition Method, *The Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundation*, Vol. 28, No. (4) pp. 107 - 118
- Lenze Elektromotoren (2012)
<http://www.lenze.at>, Datenblatt Drehstrommotoren MD
- ÖNORM B 4400-1 (2010)
Geotechnik - Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden - Regeln zur Umsetzung der ÖNORMEN EN ISO 14688-1 und -2 sowie grundlegende Symbole und Einheiten
- ÖNORM EN ISO 17892-1 (2014)
Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014)
- ÖNORM EN ISO 17892-4 (2014)
Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO/DIS 17892-4:2014)
- ÖNORM EN ISO 17892-5 (2014)
Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 5: Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung (ISO/DIS 17892-5:2014)
- Scheffer, F., Schachtschabel, P.
Lehrbuch der Bodenkunde, Kap. 2, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010
- Terzaghi, K., Beck, R., (1961)
Bodenmechanik in der Baupraxis, Kap. 41, Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg
- Watabe, Y., Saitoh, K. (2015)
Importance of sedimentation process for formation of microfabric in clay deposit, *The Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundation*; Vol. 55, No. (2) pp. 276 - 283

7 Internetverzeichnis

Google Maps (2015)

<https://www.google.at/maps>

Roth, Carl (2015)

<http://www.carlroth.com>, Silica Gel Orange, 2-5 mm mit Indikator

Styrolution (2015)

<http://www.styrolution.com>

Wikipedia (2015)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kaolinit>