



Metin Aydin, BSc

Kriterien zur Feststellung der Störung von schluffigen Bodenproben

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 wörtliche und inhaltlich entnommene 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 möchte mich an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit sowie die gute Betreuung während der Erstellung der Masterarbeit bei meinem Betreuer Dipl.-Ing Michael Havinga bedanken. Ein weiterer besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Roman Marte für die interessanten Vorlesungen in Bodenmechanik und Grundbau, welche mich dazu bewegten das Fachgebiet Geotechnik zu vertiefen.

Auch möchte ich mich bei meinen Studienkollegen Christopher Ferk, Christopher Strobl, Özkan Sekin, Muhammet Bingöl, Markus Berger, Sercan Asik, Mohammed Kshiem, Umut Can Celik, Gor Grigorjan, Daniel Comploier, und Matthias Lipp für die schöne und die erfahrungswerte Zeit an der Universität bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich noch bei meinen Freunden Mustafa Aktas, Kai-Shin Chou, Thomas Neuhold, Lukas Kazianka, und Manuel Wörndle bedanken, ohne die es weniger lustige und schöne Zeiten gegeben hätte.

Meinen Eltern Abdullah und Sultan danke ich für die jahrelange finanzielle Unterstützung sowie für alles andere, das sie mir ermöglicht haben. Ein weiterer Dank gilt meinen Geschwistern Aysel, Ömer und Ferhat, die mich während der Studienzeit des Öfteren unterstützt und motiviert haben.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich meiner lieben Frau Viyan widmen, die stets an mich geglaubt und mich in jeglicher Hinsicht unterstützt hat.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Kriterien zur Feststellung der Störung von schluffigen Bodenproben anzugeben. Seit Jahrzehnten ist das Thema der Probenstörung von großer Bedeutung bei der Ermittlung von geotechnischen Parametern. Es gibt viele Faktoren, die eine Probenstörung begünstigen und daher sollten diese erkannt und weitestgehend vermieden werden um eine gute Qualität der Versuchsergebnisse erreichen zu können. Deshalb werden in der Literaturrecherche die Störungen an den Bodenproben infolge des gesamten Probengewinn- und Vorbereitungsprozesses wie zum Beispiel Entnahme, Transport, Lagerung und Vorbereitung der Proben für die Versuche geschildert und mögliche Verbesserungen vorgeschlagen.

In weiterer Folge werden die Probenqualitätskriterien wie zum Beispiel die Porenzahländerung $\Delta e/e_o$, die volumetrische Dehnung ϵ_{vol} , die Scherwellengeschwindigkeit V_s , die Saugspannung u_r und das Steifigkeitsverhältnis M_o/M_L für die Beurteilung über die Qualität der Bodenproben beschrieben.

Zur Bestimmung der Störungen von schluffigen Bodenproben wurden folgende Probenqualitätskriterien in der Masterarbeit herangezogen.

- Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ (Lunne et al. 1997)
- Volumetrische Dehnung ϵ_{vol} (Terzaghi et al. 1996)

Sowohl mit den Ergebnissen des Kompressionsversuches aus Laborversuchen als auch mit Resultaten von Ödometerversuches der Bautechnischen Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg (BVFS) wurden die Bodenproben mit den Kriterien der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und der volumetrischen Dehnung ϵ_{vol} auf den Grad der Störung untersucht. Bei den Bodenproben handelt es sich um natürliche sowie um künstlich hergestellte Proben. Die Porenzahl e_i und die volumetrische Dehnung ϵ_{vol} wird bei der effektiven Überlagerungsspannung σ'_{vo} ermittelt, um mit den Kriterien eine Aussage über die Qualität der Probe zu treffen. Die Probenqualitätskriterien gelten im Grunde für Tonproben und anhand der ausgewerteten Ergebnisse wird versucht, inwieweit diese Kriterien einen Gebrauch für schluffige Bodenproben zulassen. Es werden auch mögliche Zusammenhänge zwischen dem Störungsgrad einer Probe, dem dem Schluffanteil und der Entnahmetiefe untersucht.

Abstract

The aim of this thesis was to determine the criteria which describe the degree of disturbance of silty soil samples. After several decades of research the matter of the sample disturbance is still deemed necessary in determining reliable geotechnical soil parameters. There are many factor which increase sample disturbance and therefore these causes have to be understood and should as far as possible prevented. Sampling process is subdivided into several categories and these are the sampling, transportation, storage and the preparation of the sample for the laboratory tests. The parts of the whole sampling process are described in detail and possible improvements are proposed to reduce the degree of sample disturbance.

Furthermore, the criteria to evaluate the quality of the soil samples for example the change in void ratio $\Delta e/e_o$, the volumetric strain ε_{vol} , the shear wave velocity V_s , the suction u_r , and the Oedometer stiffness ratio M_o/M_L are described.

To determine the degree of disturbance of silty soil specimen two criteria were used in this master thesis.

- Change in void ratio $\Delta e/e_o$ (Lunne et al. 1997)
- Volumetric strain ε_{vol} (Terzaghi et al. 1996)

With the laboratory results of the Oedometer tests and the results from the compression tests of the structural research institute of Salzburg (BVFS) the soil samples were examined with the criteria ($\Delta e/e_o$, ε_{vol}) to determine the sample quality. The evaluated silty soil specimens are natural samples as well as reconstituted samples. The void ratio e_o and the volumetric strain ε_{vol} at the in situ effective overburden stress σ'_{vo} were calculated to evaluate the quality of the soil samples. These criteria are often applied on clay and the aim is to find out if these criteria are suitable for silty soil samples. In addition, possible relationships between the degree of the disturbance with the amount of the silt and the depth were examined.

Inhalt

1	Literaturrecherche	1
1.1	Probenstörung	1
1.1.1	Störungen einer Bodenprobe.....	2
1.1.1.1	Änderung des Spannungszustandes.....	2
1.1.1.2	Änderung des Wassergehaltes und der Porenzahl.....	3
1.1.1.3	Störung der Bodenstruktur	3
1.1.1.4	Chemische Änderungen.....	4
1.1.1.5	Vermischung und Trennung der Bodenbestandteile	5
1.1.2	Spannungspfad einer gestörten Probe	6
1.1.3	Gestörte Parameter	10
1.2	Entnahmemethoden.....	20
1.2.1	Entnahmegерäte	22
1.3	Transport.....	31
1.4	Lagerung.....	32
1.5	Bestimmung der Probenqualität	33
1.5.1	Volumetrische Dehnung ϵ_{vol} als Indikator für die Probenqualität	34
1.5.2	Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ als Indikator für die Probenqualität.....	34
1.5.3	Steifigkeitsverhältnis M_0/M_L als Indikator für die Probenqualität	35
1.5.4	Scherwellengeschwindigkeit V_s als Indikator für die Probenqualität	37
1.5.5	Saugspannung u_r als Indikator für die Probenqualität	39
1.5.6	Zusammenfassung der Probenqualitätskriterien	42
1.6	Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	43
2	Laborversuche zur Bestimmung der Probenqualität	44
2.1	Bodenproben aus St. Kanzian.....	44
2.2	Probenqualitätskriterium.....	45
2.2.1	Ergebnisse der Proben (Tiefe 3.8 – 4.0 m)	46
2.2.2	Ergebnisse der Proben (Tiefe 4.68 – 4.77 m)	48
2.2.3	Ergebnisse der Proben (Tiefe 5.0 – 5.2 m)	50

2.2.4	Gesamtdarstellung der Ergebnisse St. Kanzian.....	51
2.2.5	Interpretation der Ergebnisse.....	54
3	Laborversuche zur Bestimmung der Probenqualität	55
3.1	Bodenproben aus Ginau	55
3.1.1	Korngrößenverteilung Ginau Gesamt	56
3.1.2	Gesamtdarstellung der Ginau Proben.....	58
3.1.3	Gesamtdarstellung der Probenqualitätskriterien Ginau Proben.....	59
3.1.4	Interpretation der Ergebnisse.....	62
3.2	Bodenprobe Hintermuhr	63
3.2.1	Korngrößenverteilung Hintermuhr-Probe	64
3.2.2	Gesamtdarstellung der Hintermuhr-Probe	66
3.2.3	Gesamtdarstellung der Probenqualitätskriterien Hintermuhr-Probe	67
3.2.4	Interpretation der Ergebnisse.....	70
3.3	Ergebnisse aus der BVFS (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg).....	71
3.3.1	Bodenparameter der Proben aus BVFS	71
3.3.2	Darstellung der Ergebnisse mit den Probenqualitätskriterien.....	73
3.3.3	Interpretation der Ergebnisse.....	77
4	Zusammenfassung und Ausblick	78
5	Literatur	79

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Hypothetischer Spannungspfad für einen Ton mit OCR = 1 (Ladd et al. 1963)	6
Abb. 2	Dehnungspfad (Baligh 1985)	8
Abb. 3	Einflussfaktoren auf die mittlere effektive Spannung p'_m (Hight et al. 1992)	12
Abb. 4	Einrichtung zur Zerstörung von Proben (Shogaki et al. 1994)	13
Abb. 5	Beziehung zwischen q_u -Verhältnis und R_a (Shogaki et al. 1994)	14
Abb. 6	Definition der volumetrischen Dehnung im Ödometerversuch (Shogaki 1996)	17
Abb. 7	Zusammenhang zwischen ε_{vo} und I_p (Shogaki 1996)	18
Abb. 8	Zusammenhang zwischen p_r / σ'_{vo} und Tongehalt (Tanaka et al. 2006)	19
Abb. 9	Zusammenhang zwischen p_r / σ'_{vo} und Plastizitätsindex I_p (Tanaka et al. 2006)	19
Abb. 10	Versuchsergebnisse des Ariake Tones bei unterschiedlichen Entnahmemethoden (Tanaka 2000)	23
Abb. 11	Einfluss des Schneidwinkels der Modellprobe (Horng et al. 2010)	25
Abb. 12	Einfluss des Flächenverhältnisses A_r der Modellprobe (Horng et al. 2010)	26
Abb. 13	Einfluss des Kolbens der Modellprobe (Horng et al. 2010)	26
Abb. 14	Einfluss des Schneidwinkels der Feldprobe (Horng et al. 2010)	28
Abb. 15	Einfluss des Flächenverhältnisses A_r der Feldprobe (Horng et al. 2010)	29
Abb. 16	Einfluss des Kolbens der Feldprobe (Horng et al. 2010)	29
Abb. 17	Kolbenentnahmeggerät mit und ohne ICR (lichte Weite) (La Rochelle et al. 1981)	31
Abb. 18	Einfluss des Transportes (Tanaka 2000)	32
Abb. 19	Änderung des Wertes p_r infolge der Aufbewahrung (Tanaka et al. 2006)	33
Abb. 20	Steifigkeitsverhältnis M_d/M_L für die Probenqualität (Amundsen et al. 2015)	36
Abb. 21	Methoden der Probenbeurteilung für den Klett Ton (Amundsen et al. 2015)	37
Abb. 22	Probenqualität mittels der Scherwellengeschwindigkeit und der Saugspannung (Long et al. 2010)	38
Abb. 23	Zusammenhang zwischen der Saugspannung und der Porenzahländerung (Long et al. 2009)	40
Abb. 24	Totale und metrische Saugspannung (Bulut et al. 2001)	41
Abb. 25	σ - e Diagramm bei einer Tiefe von 3.8 - 4.0 mm	46
Abb. 26	σ - ε_{vol} Diagramm in einer Tiefe von 3.8 - 4.0 m	47
Abb. 27	σ - e Diagramm bei einer Tiefe von 4.68 - 4.77 m	48
Abb. 28	σ - ε_{vol} Diagramm in einer Tiefe von 4.68 - 4.77 m	49

Abb. 29	σ - e Diagramm bei einer Tiefe von 5.0 – 5.2 m	50
Abb. 30	σ - ε_{vol} Diagramm in einer Tiefe von 5.0 – 5.2 m.....	51
Abb. 31	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei unterschiedlichen Tiefen.....	52
Abb. 32	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei unterschiedlichen Tiefen	52
Abb. 33	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei σ'_{vo}	53
Abb. 34	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei σ'_{vo}	53
Abb. 35	Korngrößenverteilung Ginau Probe.....	56
Abb. 36	Kornverteilung Ton im Mikrometer-Bereich Ginau 1/4 Probe	57
Abb. 37	σ - e Diagramm Ginau Proben	58
Abb. 38	ε_{vol} - σ Diagramm Ginau Proben.....	59
Abb. 39	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach (Lunne, et al., 1997) bei σ'_{vo} Ginau Proben	60
Abb. 40	ε_{vol} Kriterium nach (Terzaghi , et al., 1996) bei σ'_{vo} Ginau Proben	61
Abb. 41	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach (Lunne, et al., 1997) bei Schluffanteil [%].....	61
Abb. 42	ε_{vol} Kriterium nach (Terzaghi , et al., 1996) bei Schluffanteil [%]	62
Abb. 43	Hintermuhr-Probe bei der Bearbeitung	64
Abb. 44	Korngrößenverteilung Hintermuhr	64
Abb. 45	Kornverteilung im Tonbereich Hintermuhr-Probe	65
Abb. 46	σ - e Diagramm Hintermuhr-Probe.....	66
Abb. 47	ε_{vol} - σ Diagramm Hintermuhr-Probe.....	67
Abb. 48	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei σ'_{vo} Hintermuhr-Probe.....	68
Abb. 49	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei σ'_{vo} Hintermuhr-Probe.....	69
Abb. 50	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei Schluffanteil [%].....	69
Abb. 51	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei Schluffanteil [%]	70
Abb. 52	Interpolation der Porenzahl $e_{\sigma'_{vo}}$ bei σ'_{vo}	71
Abb. 53	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei σ'_{vo}	74
Abb. 54	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei σ'_{vo}	74
Abb. 55	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) mit Schluffanteil [%].....	75
Abb. 56	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) mit Schluffanteil [%]	75
Abb. 57	$\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) über die Tiefe	76
Abb. 58	ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) über die Tiefe	76

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Hauptursachen der Bodenstörung (Clayton et al. 1982).....	10
Tab. 2	Spannungsänderung im gesättigten Ton (Skempton et al. 1963)	11
Tab. 3	Angaben zu den Proben (Shogaki et al. 1994)	13
Tab. 4	Eigenschaften der Proben (Shogaki et al. 1994)	13
Tab. 5	Einflussfaktoren auf den Wert q_u (Shogaki et al. 1994).....	15
Tab. 6	Güteklassen für Bodenproben (Melzer et al. 2008)	20
Tab. 7	Entnahmeverfahren für die Kategorien A, B, C nach (ÖNORM EN ISO 22475-1 2006)	21
Tab. 8	Bezeichnungen der Entnahmehethoden (Melzer et al 2008)	22
Tab. 9	Entnahmegерäte (Tanaka 2000).....	23
Tab. 10	Geometrien der Modell-Entnahmegерäte für den Bodenmodell (Horng et al. 2010)	24
Tab. 11	Geometrien der Feld-Entnahmegерäte (Horng et al. 2010).....	24
Tab. 12	Kriterien zur Beurteilung der Probenstörung (Terzaghi et al. 1996)	34
Tab. 13	Kriterien zur Bestimmung der Probenstörung (Lunne et al. 1997)	35
Tab. 14	Probenqualität zufolge des Verhältnisses M_o/M_L Amundsen et al. 2015	36
Tab. 15	Probenqualitätskriterien aus der Literatur	42
Tab. 16	Bodenparameter St. Kanzian (Scheriau 2015)	44
Tab. 17	Bodenparameter Ginau Würfel.....	55
Tab. 18	Anteile der Bodenarten Ginau Würfelprobe und Ginau 1/4 und	56
Tab. 19	Gesamtmineralbestand und Tonmineralbestand Ginau 1/4 Probe	57
Tab. 20	Bodenparameter Hintermuhr-Probe	63
Tab. 21	Bodenarten Hintermuhr-Probe	64
Tab. 22	Bodenparameter aus den Ergebnissen von BVFS	72
Tab. 23	Bodenarten der Proben aus BVFS	72

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

A_r	[]	Flächenverhältnis des Entnahmegertes
B	[mm]	Breite des Entnahmegertes
D_a	[mm]	Außendurchmesser des Entnahmegertes
D_i	[mm]	Innendurchmesser des Entnahmegertes
G_{BE}	[kN/m ²]	maximaler Schubmodul
G_f	[kN/m ²]	Schubmodul im Feld
I_p	[]	Plastizitätsindex
K_0	[]	Erdruhedruckbeiwert
M_L	[MPa]	minimaler Steifigkeitsmodul
M_o	[MPa]	maximaler Steifigkeitsmodul
R_a	[]	Verhältnis der Querschnittsflächen der gestörten zu ungestörten Proben
S_r	[]	Sättigungsgrad
V_s	[m/s]	Scherwellengeschwindigkeit

Kleine Buchstaben

c_c	[]	Kompressionsbeiwert
c_v	[]	Konsolidierungsbeiwert
e	[]	Porenzahl
k_f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
m_v	[]	Koeffizient der Volumskompressibilität
n	[%]	Porenanteil
t	[m]	Wanddicke des Entnahmegertes
p_k	[kg]	allseitige effektive Spannung einer entnommenen Probe
p'_m	[kN/m ²]	mittlere effektive Spannung
p_r'	[kN/m ²]	effektive Restspannung
q_u	[kN/m ²]	einaxiale Druckfestigkeit
s_u	[kN/m ²]	undrionierte Scherfestigkeit
s_{ug}	[kN/m ²]	undrionierte Scherfestigkeit im Grund
s_{up}	[kN/m ²]	undrionierte Scherfestigkeit in der Probe
u	[kN/m ²]	Porendruck
u_r	[kN/m ²]	Saugspannung
w	[]	Wassergehalt
$\Delta h/h_o$	[%]	Spezifische Setzung

Griechische Buchstaben

ε_{vol}	[%]	volumetrische Dehnung
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ	[g/cm ³]	Feuchtdichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
γ'	[kN/m ²]	Wichte unter Auftrieb
σ'_p	[kN/m ²]	Vorkonsolidierungsspannung
σ'_{ps}	[kN/m ²]	effektive Spannung einer "perfekten Probe"
σ_r	[kN/m ²]	Zelldruck in der Triaxialzelle
σ_v	[kN/m ²]	totale vertikale Spannung
σ_h	[kN/m ²]	totale horizontale Spannung
σ'_{vo}	[kN/m ²]	in situ effektive Überlagerungsspannung

Abkürzungen

G	Ginau
HM	Hintermuhr
ICR	Verhältnis der lichten Weite (Inside Clearance Ratio)
KB	Kernbohrung
k.A	keine Angabe
NP	Natürliche Probe
OCR	Überkonsolidierungsverhältnis (Overconsolidation Ratio)
SD	Slurry Deposition Method
SQD	Proben-Qualitäts-Einstufung (Specimen Quality Designation)
STK	St. Kanzian
SZP	Stechzylinderprobe

1 Literaturrecherche

1.1 Probenstörung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit den Kriterien zur Feststellung des Störungsgrades von schluffigen Bodenproben, vorab muss erwähnt werden, dass die zur Verfügung stehende Fachliteratur sich vielmehr um die Untersuchung von Tonproben handelt. Bezüglich der Probenstörung von schluffigen Bodenproben gibt es nahezu keine Literatur. Die Frage ist, ob die Methoden, die in Studien zur Untersuchung des Störungsgrades von Tonproben angewendet worden sind, auch bei schluffigen Bodenproben anwendbar sind.

Jeder Eingriff in den Boden zur Probenentnahme ist mit einer Störung verbunden. Daher ist die Probenstörung ein wesentliches Thema in der Ermittlung von geotechnischen Parametern. Die Repräsentativität der geotechnischen Kenngrößen, welche im Labor ermittelt werden, ist auf die Entnahmemethoden und auf die Sorgfalt der durchzuführenden Versuche zurückzuführen.

Hinsichtlich der Beurteilung der Probenqualität wurden in den letzten 60 Jahren Forschungen durchgeführt (Hvorslev 1949, Skempton et al. 1963, Andresen et al. 1979). Im Zuge der früheren Untersuchungen sowohl an gestörten als auch an ungestörten Proben wurden die Kriterien für die Feststellung der Probenqualität aufgestellt. Des Weiteren wurden Entnahmemethoden und Versuchsmethoden entwickelt um die Störungseinflüsse auf die Probenqualität zu minimieren.

Außerdem wurden auch die Einflüsse des Entnahmeprozesses, des Transportes, der Lagerung und die Vorbereitung der Proben für die vorgenommenen Versuche auf die Probenstörung untersucht (Tanaka et al. 2006, Horng et al. 2010, Atkinson et al. 1992).

1.1.1 Störungen einer Bodenprobe

Es gibt verschiedene Ursachen für die Störungen von Bodenproben, die vor, während und nach der Entnahme auftreten können. Diese Störungen wurden nach Hvorslev (1949) folgendermaßen klassifiziert.

- Änderung des Spannungszustandes
- Änderung des Wassergehaltes und der Porenzahl
- Störung der Bodenstruktur
- Chemische Änderungen
- Vermischung und Trennung der Bodenbestandteile

In den folgenden Abschnitten werden diese Störungen nach Hvorslev (1949) näher beschrieben.

1.1.1.1 Änderung des Spannungszustandes

Die Spannungen, welche auf das Bodenelement im Untergrund wirken, verursachen eine Verformung des Bodenkörpers. Somit ist eine bestimmte Menge an elastischer Energie im Bodenelement gespeichert, die zu einer Ausdehnung des Bodenkörpers führt. Nach der Entnahme einer Bodenprobe ergibt sich eine Reduzierung der totalen Spannungen. Dabei wird infolge der Reduzierung der totalen Spannungen eine Abnahme des Porenwasserdruckes und eine geringe Volumserhöhung verursacht. Die voraussichtlichen Auswirkungen der Spannungsreduzierung für verschiedene Böden werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Gesättigter Ton

Vollgesättigte Tone beziehungsweise feinkörnige Böden mit einem großen Gehalt an blättrigen Mineralpartikeln, welche erheblichen Volumsänderungen und Verformungen nach der Ablagerungsbildung ausgesetzt sind, haben eine erhöhte Neigung zur Ausdehnung. Der Kapillardruck und die effektiven Spannungen in der entnommenen Probe können den effektiven mittleren Spannung p'_m in der ungestörten Ablagerung entsprechen, wenn eine Zerstörung der Bodenstruktur nicht gegeben ist. Viele Tonablagerungen zeigen mit der Tiefe eine geringe Änderung des Wassergehaltes w . Diese Böden zeigen, welche noch keinen Verformungen ausgesetzt sind, eine geringe Neigung zur Ausdehnung. Somit kann der Kapillardruck sehr gering werden oder erreicht den Wert Null.

Gesättigter Schluff und Sand

Solche Böden haben eine relativ geringe Neigung zur Ausdehnung während der Entlastung. Der Kapillardruck ist eher klein und ist durch den Porendurchmesser begrenzt. Bei grobkörnigen Böden neigt der Kapillardruck zu Null.

Geschichtete Böden

Wenn eine Probe abwechselnde Schichten von feinkörnigem bis grobkörnigem Material aufweist, variiert der Kapillardruck und die Reduzierung des Porenwasserdruckes von Schicht zu Schicht. In feinkörnigen Schichten ist der kapillare Druck am höchsten und der hydrostatische Druck (Porenwasserdruck) am geringsten. Eine mögliche Wassermigration von grobkörnigen Schichten zu feinkörnigen Schichten ist gegeben.

Gestörter und ungestörter Ton

Eine teilweise gestörte Probe, welche dem atmosphärischem Druck ausgesetzt ist, hat eine geringe Schwellung, einen geringen Kapillardruck und einen erhöhten Porenwasserdruck im Gegensatz zu einer ungestörten Bodenprobe. Das Wasser wandert von den gestörten zu den ungestörten Bereichen des Probenexemplars, jedoch ist dies bei stark überkonsolidierten Böden der entgegengesetzte Fall.

Teilweise gesättigte Böden

Bei verbindenden Luftkanälen in der Probe ist eine ungehinderte elastische Ausdehnung die Folge. Der oberflächliche und der innere Kapillardruck hängen von dem Grad der Sättigung und der Bodenart ab.

1.1.1.2 Änderung des Wassergehaltes und der Porenzahl

Die Änderung der Porenzahl bei einem vollgesättigten Boden ist mit einer entsprechenden Veränderung mit dem Wassergehalt verbunden. Jedoch kann die Änderung der Porenzahl bei teilgesättigten Böden ohne eine Änderung des Wassergehaltes hervorgerufen werden. Der Wassergehalt von teilweise gesättigten Böden mit verbindenden Luftkanälen könnte bei geringer Änderung der Porenzahl verändert werden.

1.1.1.3 Störung der Bodenstruktur

Die Störung der Bodenstruktur kann vor, während und nach der Entnahme einer Probe hervorgerufen werden. Im Falle einer Entnahme aus einem Bohrloch kann sich die

Störung bereits während des Bohrprozesses noch vor der Entnahme einstellen, jedoch ist die Störung auf den oberen Abschnitt der Bodenprobe beschränkt. Bei einer ordnungsgemäßen Entnahme und mit richtiger Ausrüstung kann die Störung während der Gewinnung des Probenexemplars gering gehalten werden. Der untere Abschnitt der Probe kann durch die Loslösung vom unteren Erdboden gestört werden. Bei vorausgebohrtem Loch kann die Störung während der Entnahme zu einem vernachlässigbaren Anteil abgeschwächt werden. Die Störungen nach der Entnahme können mit entsprechender Sorgfalt bei der Abdichtung, beim Transport und beim Aufbereiten der Probe vermindert werden.

Übermäßige Verformungen sind Indizien für eine Strukturstörung des Bodens. Manche plastische Böden widerstehen einigen prozentualen volumetrischen Dehnungen, ohne dass sich erhebliche Änderungen in den physikalischen Eigenschaften einstellen. Spröde Böden werden bereits bei einer prozentualen Dehnung unter 1 % gravierend gestört. Die Bodenstruktur und die physikalischen Eigenschaften können verändert werden, ohne dass äußerliche Störungen, wie die Veränderung der Dicke oder sichtbare Verformungen zu beobachten sind. Solche Störungen ohne ein äußerliches Störungsbild sind schwierig zu erkennen.

Die Störung der Struktur eines Bodens ist mit einer Schwächung der Bindung zwischen den Partikeln oder mit einer Neuordnung der strukturellen Form der Bodenkörner verbunden. Die schwache Bindung zwischen den kolloidalen Partikeln der Tonminerale und des organischen Materials ist oft thixotropisch geprägt. Die Bindung wird teilweise nach der Störung wiederaufgebaut.

Die Neuordnung der strukturellen Form der Bodenkörner entsteht durch die Änderung der Porenzahl, des Porenwasserdruckes und durch den kapillaren Druck an der Oberfläche der Probe.

1.1.1.4 Chemische Änderungen

Der Boden am unteren Abschnitt des Bohrloches kann sowohl durch die Salze des Waschwassers als auch durch die Bestandteile der Bohrspülung beeinflusst werden. Oxidation kann während der Vorbereitung für Laborversuche auftreten. Die größte Gefahr einer chemischen Änderung besteht bei der Aufbewahrung einer Probe in einem unbehandelten Stahlbehälter. Des Weiteren kann der Kontakt mit Kupfer, Messing, Zink etc. in einigen Fällen chemische Veränderungen in der Bodenprobe verursachen.

Das Vorhandensein von Säuren und Basen in der Bodenprobe oder im Porenwasser führt zu einer verstärkten chemischen Veränderung. Auch elektrische Ströme, welche bei Kontakt von verschiedenen Metallen mit der Probe entstehen, verursachen chemische Veränderungen. Organische Böden zeigen infolge der Oxidation Farbveränderungen auf. Der Kontakt mit Metallen und insbesondere mit Stahl führt zu auffälligen Verfärbungen.

Eine Korrelation zwischen den chemischen und den physikalischen Veränderungen sollte aufgestellt werden, bevor die Ergebnisse der chemischen Versuche richtig beurteilt werden können.

In Böden mit Tonmineralien erfolgt die chemische Änderung hauptsächlich durch den Basen-Austausch oder durch den Austausch der Kationen an der Oberfläche oder an den Ecken des Kristallgerüsts der Mineralien mit den Ionen im Porenwasser. Die Änderung in den physikalischen Eigenschaften hängt von der Art der ausgetauschten Ionen ab. So führt ein Austausch der Natrium-Ionen mit den Kalzium-Ionen und besonders mit den Wasserstoff-Ionen, Eisen-Ionen oder den Aluminium-Ionen zu einer Reduzierung der Atterberg'schen Grenzen, der Kompressibilität und zu einer Erhöhung des Scherwiderstandes.

1.1.1.5 Vermischung und Trennung der Bodenbestandteile

Wenn nur die Bodenschichten vermischt werden, kann die Probe als repräsentativ für Bauzwecke betrachtet werden. Die Proben sind für Laborversuche ungeeignet, wenn einige Bestandteile des Bodens entfernt oder mit distanzierenden Bodenschichten und mit Fremdstoffen versetzt werden.

1.1.2 Spannungspfad einer gestörten Probe

Anhand der Abbildung 1 des hypothetischen Spannungspfad eines Tones mit einem Überkonsolidierungsverhältnisses OCR von 1 ist die Änderung des Spannungszustandes einer in situ entnommenen Probe bis zu dem Versuch im Labor beschrieben.

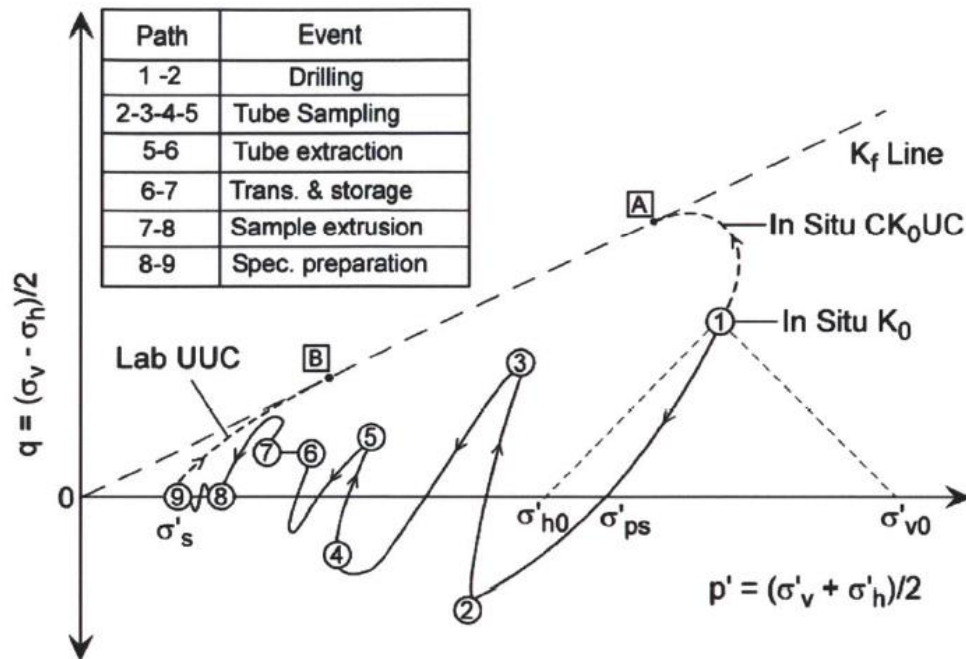


Abb. 1 Hypothetischer Spannungspfad für einen Ton mit OCR = 1 (Ladd et al. 1963)

Infolge des gesamten Entnahmeprozesses bis zu den Laborversuchen durchgeht der Spannungspfad folgende Punkte.

- 1-2 Bohren
- 2-3-4-5 Probenentnahme
- 5-6 Gewinnung der Probe
- 6-7 Transport und Lagerung der Probe
- 7-8 Herausnahme der Probe
- 8-9 Vorbereiten der Probe für die Versuche

Nachgehend erfolgt die Beschreibung der Schritte des Spannungspfades nach (DeGroot et al. 2007)

- **Pfad 1-2. Bohren:** Nachdem die gewünschte Tiefe angebohrt ist, reduzieren sich im Bohrloch an der Unterseite die totalen vertikalen Spannungen σ_v . Somit ist der Ton einem Spannungsabbau ausgesetzt. Jedoch kann dies mit einer Bohrspülung weitestgehend vermieden werden. Dabei sollte die Bohrspülung in etwa die Wichte 1.2 γ_w und 1.3 γ_w haben (Ladd et al. 2003). Der Spannungspfad kreuzt die x-Achse, wobei dieser Punkt σ'_{ps} den "effektiven Spannungen einer perfekten Entnahme" entspricht.

Die "effektive Spannung einer perfekten Entnahme" σ'_{ps} kann mit der Gleichung 1 berechnet werden (Ladd et al. 1963). Dieser Ansatz der perfekten Entnahme sollte für Blockproben verwendet werden.

$$\sigma'_{ps} = \sigma'_{vo} [K_0 + A_u(1 - K_0)] \quad (1)$$

σ'_{ps}	[N/m ²]	effektive Spannung nach Ansatz der perfekten Entnahme
σ'_{vo}	[N/m ²]	effektive vertikale Spannung
K_0	[]	Erdruchdruckbeiwert
A_u	[]	Parameter für die undrained Scherspannung bei Entlastung

- **Pfad 2-3-4-5 Probenentnahme:** Bei diesem Entnahmevergange der Probe findet eine zyklische Belastung statt. Bei der Penetration des Entnahmegertes kommt es, in Pfad 2-3 ersichtlich, zu einer Kompression des Bodens vorne an dem Entnahmerohr. Im weiteren Vorgang der Gewinnung der Probe kommt es, nachdem der Boden in das Rohr gedrückt wird, zu einer Entspannung der Probe, siehe Pfad 3-4. Innerhalb des Rohres stellt sich schließlich ein Zusammendrücken des Bodens ein, Pfad 4-5. Der Boden erfährt in dem Moment des Eindringens in das Entnahmegert einen komplexen Dehnungspfad, welcher von der Position des Bodenelementes innerhalb der Probe und von der Rohrgeometrie abhängt. Die Dehnungen erhöhen sich mit der relativen Dicke des Entnahmegertes (Santagata et al. 2002).

Die Abbildung 2 zeigt den Dehnungspfad für einen Boden, der entlang der Mittellinie in das Rohr gedrückt wird, für verschiedene Breiten B und verschiedene Wanddicken t_i eines Entnahmerätes. An dieser Abbildung 2 ist der Bereich für Kompression und Ausdehnung der Probe entlang des Entnahmerohres eindeutig ersichtlich. Des Weiteren ist in diesem Diagramm das Verhältnis der Breite B_i zu der Wanddicke t_i gegeben und das Verhältnis der lichten Weite ICR (Inside Clearance Ratio). Dieses Verhältnis ICR wird zufolge der Gleichung 2 berechnet.

$$ICR = \frac{100(B_i - B_e)}{B_e} \quad (2)$$

B_i [m] innerer Durchmesser des Kolbenentnahmezylinders
 B_e [m] minimaler Durchmesser des Kolbenentnahmezylinders

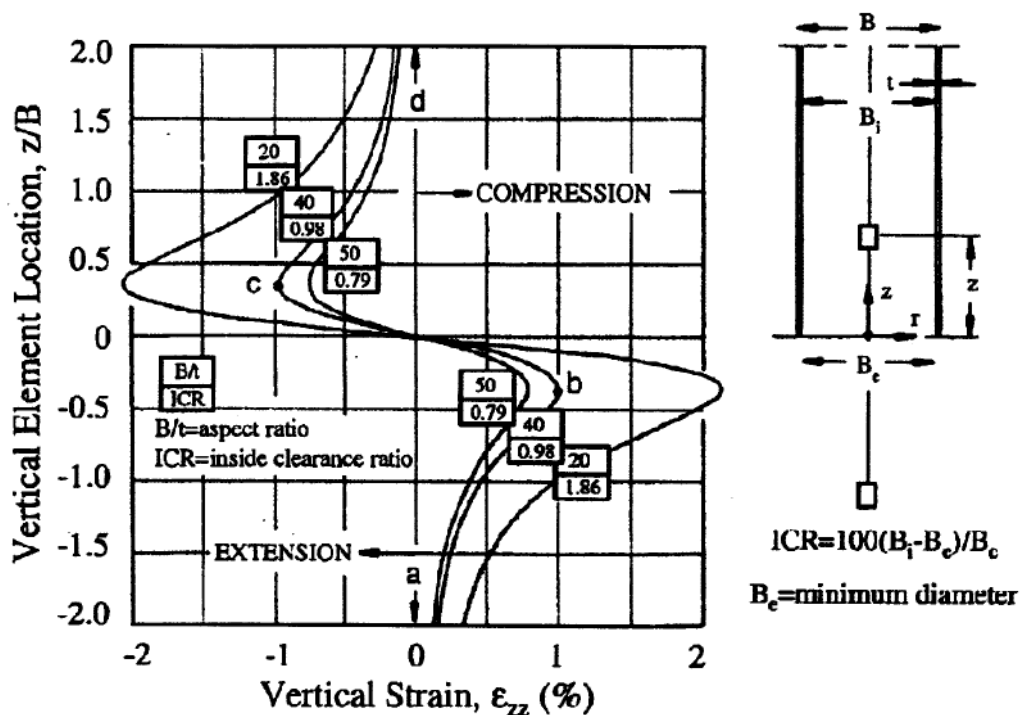


Abb. 2 Dehnungspfad (Baligh 1985)

- **Pfad 5-6 Gewinnung der Probe:** Gestörter Boden gelangt während der Probengewinnung in das Rohr und dies kann am Fuß- und Kopfpunkt der Probe, die Probenqualität wesentlich verschlechtern.

- **Pfad 6-7 Transport und Lagerung der Probe:** Große Temperaturschwankungen und starke Vibrationen während des Transportes tragen einen Teil zur Probenstörung bei. Des Weiteren reduziert sich die effektive Spannung einer Probe während der Lagerung. Die Verminderung dieser Spannungen ist aufgrund des möglichen Porenwasserüberdrucks in der deformierten Randzone der Probe zurückzuführen, welcher während des Abscherens der Probe an der Innenwand des Rohres entsteht.
- **Pfad 7-8 Herausnahme der Probe:** Nach einer gewissen Zeit legt sich die Probe an der Innenwand an und in den meisten Fällen wirkt dieser Effekt bei der Herausnahme der Bodenprobe nachteilig auf die Probenqualität.
- **Pfad 8-9 Vorbereiten der Probe:** Tätigkeiten zur Vorbereitung der Probe für die Laborversuche, wie zum Beispiel Trimmen und Einbau, führen zu einer weiteren Störung der Probe.

Die Störungen an der Probe können in verschiedenen Abschnitten des Untersuchungsprozesses auftreten. Etliche Störmechanismen treten schnell auf und andere wiederum benötigen Zeit um mobilisiert werden zu können. Einige Störungen sind unvermeidbar, aber es können viele minimiert oder sogar neutralisiert werden, wenn man die Störmechanismen versteht und die Prozesse optimiert. Die Störungen an der Probe infolge des gesamten Prozesses der Entnahme bis zum Labor können als folgende Mechanismen klassifiziert werden (Clayton et al. 1982).

- Änderung des Spannungszustandes
- Mechanische Verformung
- Änderung des Wassergehaltes und der Porenzahl
- Chemische Änderungen

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Ursachen der Störungen in den verschiedenen Abschnitten des Entnahmeprozesses.

Tab. 1 Hauptursachen der Bodenstörung (Clayton et al. 1982).

Vor der Entnahme	Während der Entnahme	Nach der Entnahme
Spannungsabbau	Spannungsabbau	Spannungsabbau
Schwellen	Umformung	Migration des Wassers in der Probe
Verdichtung	Verschiebung	Feuchtigkeitsverlust
Verschiebung	Zerrütten	Einfrieren
Sohlhebung	Steine am Schneidschuh	Überhitzen
Piping	Vermischung und Trennung	Erschütterung
Einsinken	Verlorene Probe	Chemische Änderung infolge der Herausnahme der Probe

1.1.3 Gestörte Parameter

Bei der Entnahme einer Bodenprobe stellen sich ungewollte Störungen ein, die zu der Verfälschung von geotechnischen Kennzahlen führen können. Dabei werden gewisse Parameter mehr oder weniger unterschiedlich beeinflusst. Einige Kennzahlen weisen eine hohe Anfälligkeit bei Probenstörung auf und andere Parameter wiederum reagieren auf Störungen weniger sensibel.

Die undrained Scherfestigkeit einer entnommenen Tonprobe entspricht nach Skempton et al. (1963) der undrained Scherfestigkeit im Boden, solange es zu keiner Änderung des Wassergehaltes während der Entnahme kommt. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Dehnungen während der Entnahme nicht allzu groß sind um gravierende mikrostrukturelle Veränderungen hervorzurufen.

In der folgenden Tabelle 2 sind zwei Fälle für die Ermittlung der undrained Scherfestigkeit dargestellt. Im ersten Fall (Grund) sind die ursprünglichen Spannungen im Boden zu sehen, die im undrained Triaxialversuch bis zum Bruch gesteigert werden. Im zweiten Fall (Probenentnahme) ist der Spannungszustand in situ und im Labor ersichtlich. Die totalen vertikalen σ_1 und horizontalen σ_3 Spannungen werden bei der Gewinnung der Probe in situ zu Null reduziert.

Die Folge der Verminderung der totalen Spannungen zu Null ist das Auftreten eines negativen Porenwasserdruckes u_k . Die Tonprobe ist somit dem allseitigen effektiven Spannungen p_k ausgesetzt.

Tab. 2 Spannungsänderung im gesättigten Ton (Skempton et al. 1963)

	Spannungen	Konsolidierung	Probenentnahme		Bruch		
Grund	Totale Spannungen	$\sigma_1 = 120.1$ 			$(\sigma_1)_{BG} = 132.3$ 		
	Porenwasserdruck	$u_0 = 30.0$			$u_{BG} = 51.8$		
	Effektive Spannungen	$\sigma' = 90.1$ $K_0 \cdot \sigma' = 53.5$ 			$(\sigma'_1)_{BG} = 80.5$ $(\sigma'_3)_{BG} = 31.7$ 		
			undrännierte Scherfestigkeit		$s_{ug} = 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) = 24.4$		
Probenentnahme	Totale Spannungen	$\sigma_1 = 120.1$ $\sigma_3 = 83.5$ 	$\sigma_1 = 0$ $\sigma_3 = 0$ 	In Situ $\sigma_3 = 83.5$ 	Labor $\sigma_3 = 83.5$ 	$(\sigma_1)_{BP} = 130.9$ $\sigma_3 = 83.5$ 	
	Porenwasserdruck	$u_0 = 30.0$	$u_k = -p_k = -51.4$	$u_0 = u_k + \sigma_3 = 32.1$		$u_{BP} = 53.6$	
	Effektive Spannungen	$\sigma' = 90.1$ $K_0 \cdot \sigma' = 53.5$ 	$p_k = 51.4$ 	$p_k = 51.4$ 	$p_k = 51.4$ 		$(\sigma'_1)_{BP} = 77.3$ $(\sigma'_3)_{BP} = 29.9$
					undrännierte Scherfestigkeit	$s_{up} = 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) = 23.7$	

Bei einer geringen mechanischen Störung wird die allseitige effektive Spannung in der Probe p_k und die undrännierte Scherfestigkeit s_u ein wenig vermindert. Jedoch tritt bei einer kompletten mechanischen Störung eine größere Reduzierung p_k in der Bodenprobe auf. Der Wert p_k entspricht circa der mittleren effektiven Spannung p'_m im Grund und kann mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$p_k = \sigma'_{vo} \frac{(1 + 2K_0)}{3} = p'_m \tag{3}$$

p_k [N/m²] allseitig effektive Spannung in der Probe

p'_m [N/m²] mittlere effektive Spannung

σ'_{vo} [N/m²] vertikale effektive Spannung

K_0 [] Erdruhedruckbeiwert

Die mittlere effektive Spannung p'_m einer weichen Tonprobe wird nach Hight et al. (1992) durch mehrere Faktoren beeinflusst. Die Ursachen der Störungen und die Änderung der mittleren effektiven Spannung p'_m sind in der Abbildung 3 dargestellt.

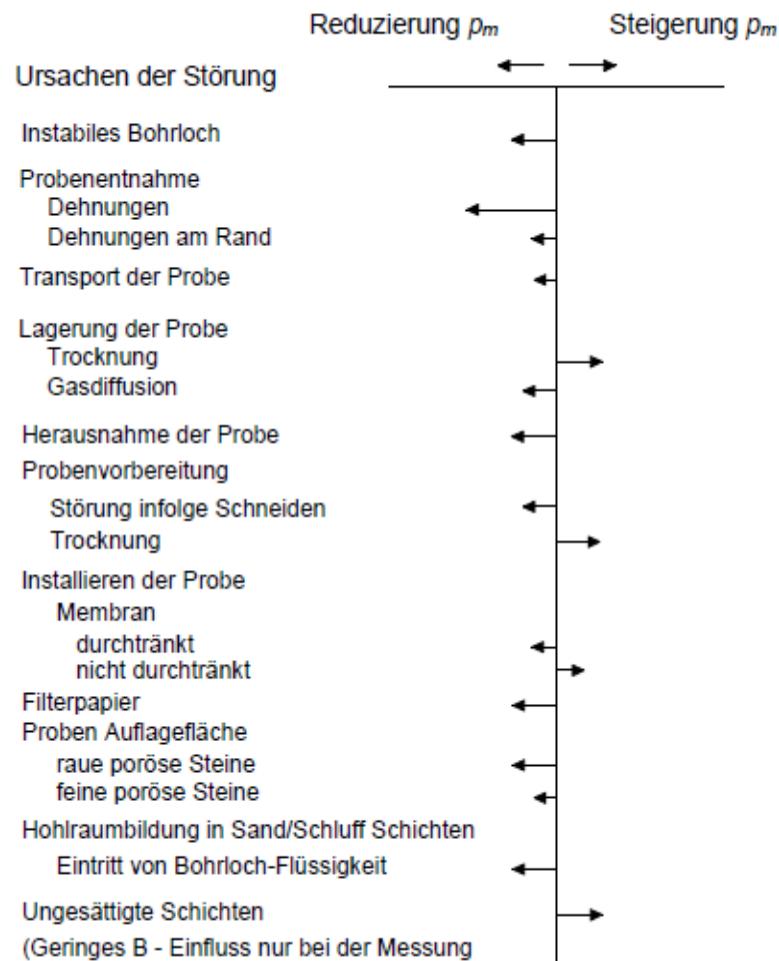


Abb. 3 Einflussfaktoren auf die mittlere effektive Spannung p'_m (Hight et al. 1992)

In einer Studie nach Shogaki et al. (1994) wurden Bodenproben, welche aus Japan stammen, bewusst gestört und in 5 Klassen eingeteilt (siehe Tab. 3). Die Klasse A entspricht einer ungestörten Probe und die weiteren Klassen B, C und D sind mit größeren Störungen versehen. Bei der letzten Klasse E ist die Probe in ihrer inneren Struktur umgeformt. An der Vorderseite der Presse wurde eine Störvorrichtung angebracht, indem die Proben mit verschiedenen Durchmesser rausgedrückt worden sind (siehe Abb.4).

Der Zusammenhang zwischen den Konsolidierungsparametern und Probenstörung wird als Funktion von q_u -Verhältnis (Verhältnis zwischen q_u gestörte Probe zu q_u ungestörte Probe) ausgedrückt. Dabei wurden folgende Parameter wie der Kompressionsbeiwert c_c , der Konsolidierungsbeiwert c_v , der Koeffizient der Volumskompressibilität m_v und der Durchlässigkeitsbeiwert k untersucht.

Im Zuge dieser Studie stellte es sich heraus, dass die Werte c_v , und k bei einer Störung des Bodens kleiner werden und der Wert m_v größer wird. Die Beziehung zwischen dem q_u Verhältnis und dem Verhältnis der Querschnittsflächen R_a der gestörten zu ungestörter Probe ist in der Abbildung 5 zu sehen.

Tab. 3 Angaben zu den Proben (Shogaki et al. 1994)

Proben	d [cm]	A_E [cm ²]	R_A
A	7.50	44.18	1.000
B	7.12	39.86	0.902
C	6.72	35.47	0.803
D	6.33	31.44	0.712
E	Umgeformte Probe		

Tab. 4 Eigenschaften der Proben (Shogaki et al. 1994)

Boden	T-3	T-9	T-10	T-11	T-13	T-18	T-21
Tiefe [%]	12	18	19	20	22	26	29
Sand [%]	1.2	5.8	18.5	1.9	0.5	2.4	3.8
Schluff [%]	93.6	38.0	47.7	46.4	53.0	81.5	79.0
Ton [%]	5.2	56.2	33.8	51.7	46.5	16.1	17.2
w_L [%]	50.6	64.2	87.1	79.5	95.2	91.5	78.3
I_p [%]	25.8	36	50.8	44.1	57.2	53.6	42.9

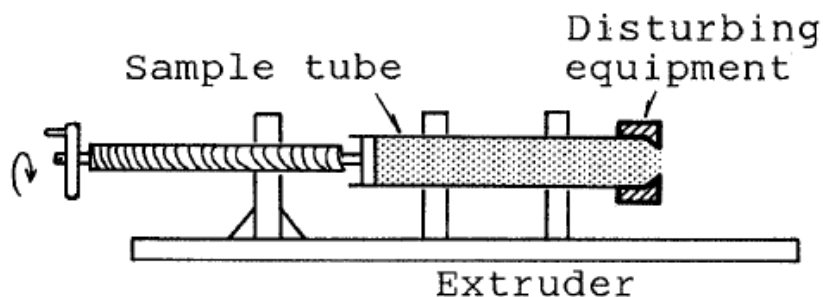


Abb. 4 Einrichtung zur Zerstörung von Proben (Shogaki et al. 1994)

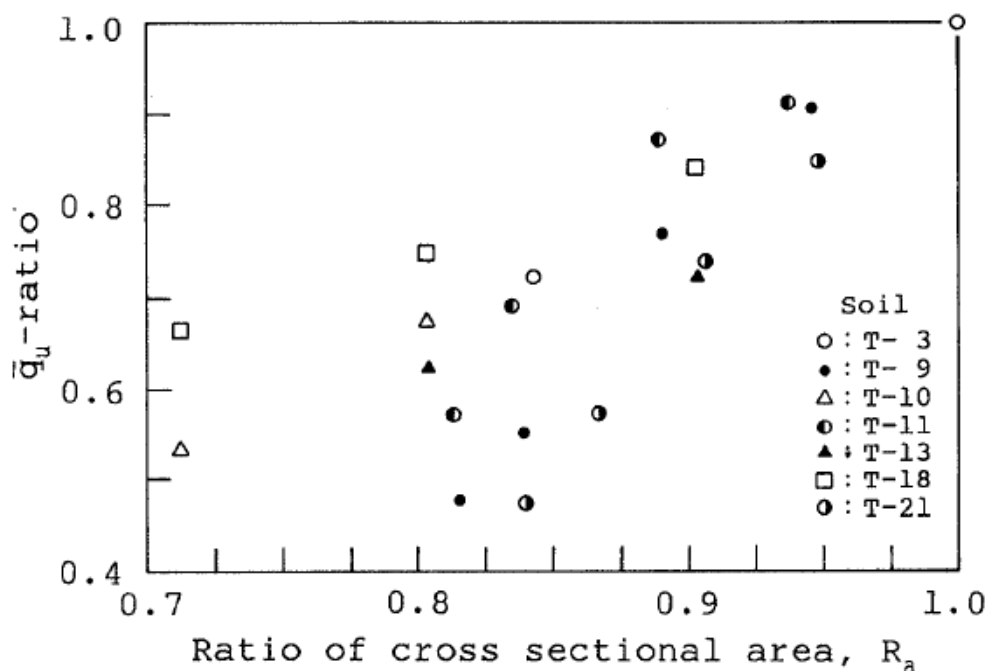


Abb. 5 Beziehung zwischen q_u -Verhältnis und R_a (Shogaki et al. 1994)

In der Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit q_u und dem Grad der Störung zu erkennen. Bei höherem Grad der Störung reduziert sich die einaxiale Druckfestigkeit.

Einer Studie nach Tanaka (2000) zufolge, kann die Reduzierung der einaxialen Druckfestigkeit q_u auf den Verlust der effektiven Restspannung p_r' und auf die Zerstörung der Bodenstruktur zurückgeführt werden. In früheren Forschungen wurde angenommen, dass diese zwei Phänomene gleichzeitig auftreten würden. Wenn jedoch die Struktur unverändert bleibt und nur die effektive Restspannung p_r' verloren geht, dann ist es möglich die Probe auf ihren ursprünglichen Spannungszustand zu konsolidieren, den in situ Spannungszustand und ein ähnliches Bodenverhalten reproduzieren zu können. Wenn jedoch die Bodenstruktur zerstört ist und die e - $\log p$ Kurve zu dem in situ Verhalten verschieden ist, dann ist die Rekompensationstechnik nicht geeignet um ein realistisches Bodenverhalten wiederzugeben. Bei der Rekompensationstechnik wird die Probe unter dem effektiven Spannungszustand anisotrop konsolidiert.

Die Eigenschaften des Bodens werden stark von den effektiven Spannungen beeinflusst. Einige Forscher sehen die Bodenstörung als ein Resultat der verlorenen effektiven Spannungen in situ σ'_{vo} an (Ladd et al. 1963, Skempton et al. 1963).

Die Bodenprobe, welche ein Drittel der Länge jenseits des Schneidschuhes innerhalb des Entnahmerohres ist, führt zur höchsten einaxialen Druckfestigkeit q_u (Tanaka et al. 2006). Weitere den Wert q_u beeinflussende Faktoren sind in der folgenden Tabelle 5 aufgelistet.

Tab. 5 Einflussfaktoren auf den Wert q_u (Shogaki et al. 1994)

A	1	Übermäßige Kompression des Bodens aufgrund der Penetration des Entnahmegertes bei fehlendem Bohrloch
	2	Schwellen des Bodens bei unzureichender Bohrspülung
	3	Schnelles Erhöhen des Pumpdruckes während der Bohrung
B	1	Unerwartete Bewegung des Bodens innerhalb des Entnahmegertes entlang der Wand
	2	Deformation der Bodenprobe aufgrund unzureichender Härte des Entnahmegertes
	3	Übermäßige Kompression der Bodenprobe aufgrund fehlender Entlüftung
C	1	Kompression des Bodens am unteren Ende des Bohrloches infolge abgelöster Bohrstange
	2	Bohrspülung zwischen stationärem Kolben und der Bodenprobe
	3	Verformung am Schneidschuh
D	1	Übermäßige Kompression der Bodenprobe aufgrund der unzureichender Verriegelung des stationären Kolbens
	2	Entnahme mittels einem freien Kolbenentnahmegertes
E	1	Ungleichmäßiges Einführen des Entnahmegertes
	2	Probenstörung aufgrund der Existenz zufällig verteilter Schalen (Fossilien)
	3	Einführen des Entnahmegertes zu 10 % mehr als normal
F	1	Rotation des Entnahmegertes vor dem Zurückziehen
	2	Abteufend der Verrohrung vor dem Zurückziehen des Entnahmegertes
	3	Abfallen des Entnahmegertes mit der Probe auf die Sohle des Bohrloches

G	1	Deformation des Entnahmegertes während des Zurückziehens des Zylinders
	2	Saugspannung an dem oberen Ende der Probe infolge Zurückziehens des Kolbens
	3	Erschütterungen und Stöße infolge der Maschine
H	1	Versuche an der Probe bei unzureichender Abdichtung
	2	Bewegungen an der Probe während der Abdichtung des Entnahmegertes
	3	Fallen des Entnahmegertes während der Abdichtung
I	1	Verformungen des Entnahmegertes infolge Temperaturschwankungen
	2	Verformungen des Entnahmegertes infolge hoher Temperaturen
	3	Erschütterungen während des Transportes
J	1	Reibung zwischen der Probe und dem Zylinder während des Herausdrückens
	2	Horizontale Herausnahme der Proben
	3	Übermäßige Befestigung des Entnahmerohres während des Herausdrückens
K	1	Versuche an der Probe zwischen 7 und 10 Tage nach der Entnahme
	2	Zwei Proben zu je 35 mm Durchmesser aus einer Probe mit 75 mm Durchmesser
	3	Trimmen der Proben von ungeschicktem Personal
	4	5 % / min Dehnungsrate während der Kompression

In einer weiteren Forschung nach Shogaki (1996) wurden sowohl an ungestörten holozänen marinen Tonproben (Probe S_1) als auch an bewusst gestörten Proben (S_6) Versuche durchgeführt um den Zusammenhang der volumetrischen Dehnung ϵ_{vo} zwischen dem Plastizitätsindex I_p , der effektiven Spannung in situ σ'_{vo} und dem Überkonsolidierungsverhältnis OCR zu untersuchen. Dabei kann die volumetrische Dehnung ϵ_{vo} als ein Indikator für die Probenstörung angegeben werden. Die folgende Gleichung 4 beschreibt die volumetrische Dehnung ϵ_{vo} .

$$\varepsilon_{vo} = \frac{(e_0 - e_1)}{1 + e_0} * 100 (\%) \quad (4)$$

e_0 [] ursprüngliche Porenzahl in der Probe

e_1 [] ermittelte Porenzahl in der Ödometerkurve bei σ'_{vo}

In der Abbildung 6 sind die Ödometerkurven zweier Proben dargestellt, wobei die Probe S_1 ungestört und die Probe S_6 restrukturiert ist. Bei der restrukturierten Probe S_6 ist die Kurve steiler als die Verlaufslinie der Probe S_1 . Somit ist anhand der Form der Kurve eine Störung der Probe zu erkennen.

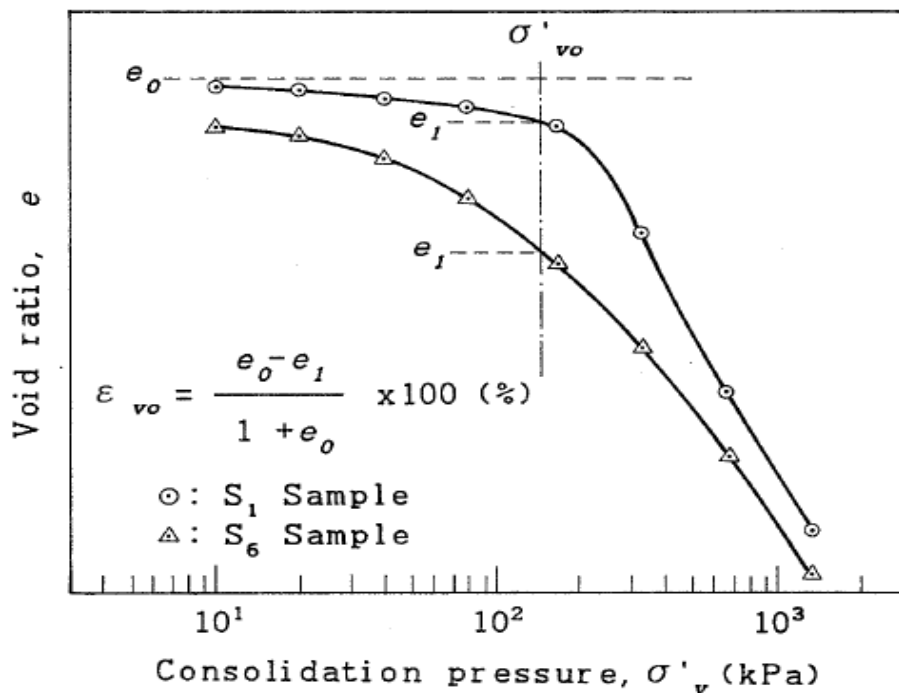


Abb. 6 Definition der volumetrischen Dehnung im Ödometerversuch (Shogaki 1996)

Die volumetrische Dehnung ε_{vo} wird bei steigender Probenstörung, bei steigendem Plastizitätsindex und bei höherer effektiven Spannung in situ σ'_{vo} größer. In der Abbildung 7 ist der Zusammenhang zwischen der volumetrischen Dehnung ε_{vo} und dem Plastizitätsindex I_p angegeben.

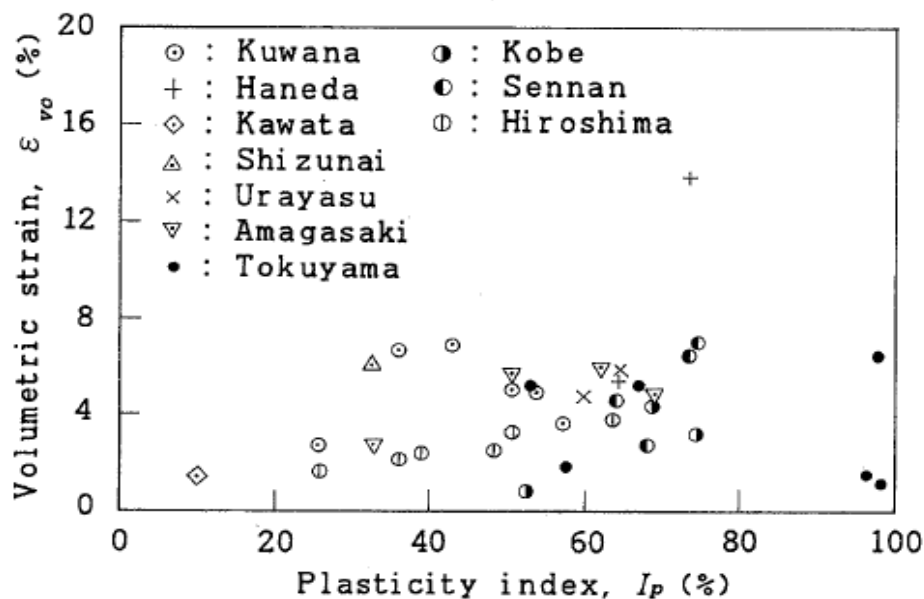


Abb. 7 Zusammenhang zwischen ε_{vo} und I_p (Shogaki 1996)

Ein weiterer Parameter, welcher während des Entnahmeprozesses und der darauffolgenden Vorgängen gestört wird, ist die effektive Restspannung p_r' auch Saugspannung genannt. Während des Entnahmeprozesses wird die vertikale totale Spannung σ_v idealerweise zu Null, aber durch die Reibung zwischen der Wand und der Probe wirkt ein kleiner Anteil der effektiven Spannungen in vertikaler Richtung. In horizontaler Richtung wirkt auch aufgrund der Begrenzung infolge des Rohres ein Anteil der horizontalen Spannungen σ_h . Ein geringer Porenwasserüberdruck entsteht aufgrund der Volumsänderung, die sowohl durch das Hineindrücken des Rohres als auch infolge der angreifenden Reibung in der Innenwand des Rohres entsteht. Nach dem Herausdrücken der Tonprobe im Labor werden die Spannungen σ_v und σ_h zu Null und ein negativer Porenwasserdruck ist die Folge (Tanaka et al. 2006).

Des Weiteren untersuchte Tanaka et al. (2006) die Faktoren, welche die effektive Restspannung p_r' beeinflussen. Die Tonproben stammen von 10 verschiedenen Entnahmestellen und es wurde stets die gleiche Entnahmemethode verwendet. Es wurden auch künstliche Proben hergestellt um den Einfluss des Tongehaltes und des Plastizitätsindex I_p auf die effektive Restspannung p_r' zu erforschen. Dabei stellte sich heraus, dass je kleiner die Partikeln sind, desto kleiner die Poren und umso größer die Kapillarkräfte. Durch einen höheren Anteil an Tongehalt ist eine Erhöhung des Verhältnisses p_r' / σ'_{vo} zu sehen außer bei den Proben Drammen und Pusan (Abb.8).

Des Weiteren steigt mit der Größe des Plastizitätsindex I_p das Verhältnis p_r' / σ'_{vo} . Die Proben Louisville und Bangkok weisen zwar das gleiche I_p auf, jedoch ist das Verhältnis p_r' / σ'_{vo} unterschiedlich (siehe Abb. 9).

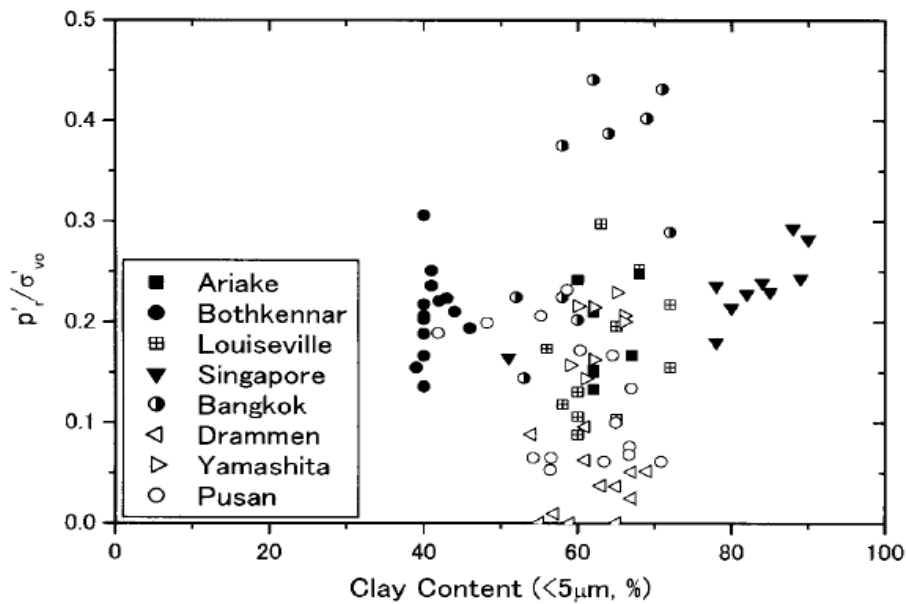


Abb. 8 Zusammenhang zwischen p_r' / σ'_{vo} und Tongehalt (Tanaka et al. 2006)

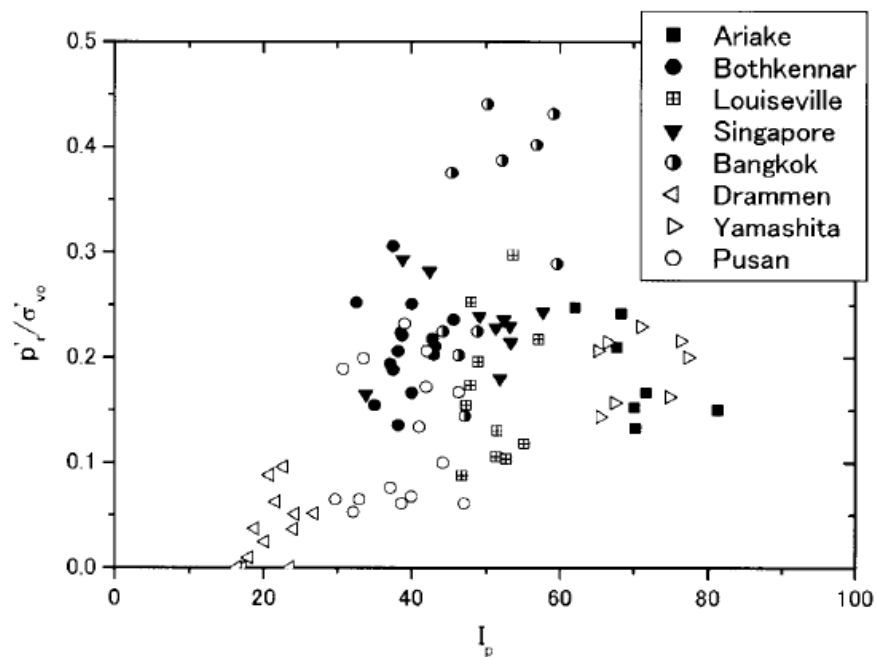


Abb. 9 Zusammenhang zwischen p_r' / σ'_{vo} und Plastizitätsindex I_p (Tanaka et al. 2006)

1.2 Entnahmemethoden

Probennahmen und Untersuchungen sind ein wichtiger Bestandteil für die Erstellung eines Baugrundmodells. Die Entnahmetechnik sollte derart gewählt werden, dass die gewünschte Güteklasse erreicht werden kann, wobei es, aufgrund der Störungen, nicht immer möglich ist die entsprechende Güteklasse zu erlangen. Infolge der Entnahme einer Probe treten nach Melzer et al. (2008) folgende Störungen auf.

- Mechanische Störungen infolge des Bohr- und Entnahmeverfahrens
- Spannungsbezogene Störungen durch Spannungsabbau der Probe
- Veränderungen sowohl in der Material-Zusammensetzung als auch in der chemischen Zusammensetzung
- Umlagerung größerer Körner an der Schneide

In der EN 1997-2 (2012) werden Proben zufolge der unveränderten Bodeneigenschaften in fünf Güteklassen eingeteilt. Dabei hängt die Güteklasse von der Bodenart, dem Entnahmegesetz, dem Entnahmeverfahren, dem Transport, der Lagerung und von der Sorgfalt ab. Die Tabelle 6 gibt sowohl die Güteklassen für Bodenproben an, als auch die Kategorien für die Entnahmeverfahren (Melzer et al. 2008).

Tab. 6 Güteklassen für Bodenproben (Melzer et al. 2008)

Bodeneigenschaften/Güteklassen	1	2	3	4	5
Unveränderte Bodeneigenschaften					
– Kornverteilung	x	x	x	x	
– Wassergehalt	x	x	x		
– Wichte, Lagerungsdichte, Durchlässigkeit	x	x			
– Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit	x				
Eigenschaften, die ermittelt werden können					
– Schichtenfolge	x	x	x	x	x
– Schichtgrenzen starke Schichten	x	x	x	x	
– Schichtgrenzen feine Schichten	x	x	x	x	
– Atterbergsche Grenzen, spezifisches Gewicht, organischer Anteil	x	x	x		
– Wassergehalt	x	x			
– Wichte, Lagerungsdichte, Porenvolumen, Durchlässigkeit	x	x			
– Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit	x				
Zu verwendendes Entnahmeverfahren (Kategorie)	A				
	B				
				C	

Die ÖNORM EN ISO 22475-1 (2006) gibt folgende Möglichkeiten zur Gewinnung von Bodenproben an.

- Bohrverfahren (Rotationsbohrungen, Rammbohr- und Rotationsrammbohrverfahren, Schlagbohrverfahren, pneumatische Verfahren und greifende Verfahren)
- Entnahmegерäte (offene Entnahmegерäte, Kolbenentnahmegерäte, SPT - Entnahmegерät und Schlitzentnahmegерäte)
- Blockproben (aus Schürfen, aus Großprobenentnahmegерäten, mittels Hand)

In der Tabelle 7 sind die Probeentnahmeverfahren für verschiedene Bodenarten der Kategorien A, B und C angegeben. In der Kategorie A werden Verfahren eingesetzt, bei der keine bzw. nur eine leichte Störung der Bodenstruktur während des Entnahmeverganges und der Probenvorbereitung auftritt. In der Kategorie B wird die Struktur des Bodens gestört, wobei aber der natürliche Wassergehalt erhalten bleibt. Eine totale Veränderung der Struktur wird durch die Verfahren der Kategorie C hervorgerufen (Melzer et al. 2008).

Tab. 7 Entnahmeverfahren für die Kategorien A, B, C nach (ÖNORM EN ISO 22475-1 2006)

Bodenart	Anwendbarkeit hängt z.B. ab von	Probeentnahmeverfahren		
		Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C
Ton	Zähigkeit oder Festigkeit Empfindlichkeit Plastizität	PS-PU OS-T/W-PU ^{b)} OS-T/W-PE ^{a)} OS-TK/W-PE ^{a,b)} CS-DT, CS-TT LS, S-TP, S-BB	OS-T/W-PE CS-ST HSAS AS	AS
Schluff	Zähigkeit oder Festigkeit Empfindlichkeit Grundwasseroberfläche	PS OS-T/W-PU ^{b)} OS-TK/W-PE ^{a,b)} LS,S-TP	CS-DT, CS-TT OS-TK/W-PE HSAS	AS CS-ST
Sand	Korngröße Dichte Grundwasseroberfläche	S-TP OS-T/W-PU ^{b)}	OS-TK/W-PE ^{b)} CS-DT, CS-TT HSAS	AS CS-ST
Kies	Korngröße Dichte Grundwasseroberfläche	S-TP	OS-TK/W-PE ^{a,b)} HSAS	AS CS-ST
Organische Böden	Grad der Zersetzung	PS OS-T/W-PU ^{b)} S-TP	CS-ST HSAS AS	AS

Tab. 8 Bezeichnungen der Entnahmemethoden (Melzer et al 2008)

OS-T/W-PU	Offenes Entnahmegesetz, dunnwandig, eingedrückt
OS-T/W-PE	Offenes Entnahmegesetz, dunnwandig, schlagend eingebracht
OS-TK/W-PE	Offenes Entnahmegesetz, dickwandig, schlagend eingebracht
PS	Kolbenentnahmegesetz
PS-PU	Kolbenentnahmegesetz, eingedrückt
LS	Großes Entnahmegesetz
CS-ST	Rotationskernbohrung, Einfachkernrohr
CS-DT, CS-TT	Rotationskernbohrung, Doppel- oder Dreifachkernrohr
AS	Schneckenbohrung
HSAS	Hohlschneckenbohrung
S-TP	Entnahmegesetz für Proben aus Schürfen
S-BB	Entnahmegesetz für Proben an der Bohrlochsohle

^{a)} Einsatz nur unter sehr günstigen Bedingungen; ^{b)} für Detailabmessungen siehe EN ISO 22475-1, Abschnitt 6.4.2.3.

1.2.1 Entnahmegesetze

Die Entnahmemethoden haben einen wesentlichen Einfluss auf die Probenqualität und daher wurden Entnahmegesetze entwickelt, welche die Störungen während der Gewinnung der Probe gering halten. In den Forschungen wurden Gesetze mit unterschiedlichen Geometrien untersucht um die Qualität der Proben zu verbessern (Tanaka 2000, Lunne 2006, Horng et al. 2010). Einerseits wurden Proben aus unterschiedlichen Regionen mit gleichem Entnahmegesetz untersucht und andererseits wurden aus einer Region Proben mit verschiedenen Entnahmegesetzen entnommen und untersucht. Der Einfluss des Flächenverhältnisses A_r , des Verhältnisses der lichten Weite ICR (siehe Gleichung 2) und der Wanddicke auf die Qualität der Probe wurde untersucht. Die Gleichung 5 beschreibt das Flächenverhältnis eines Entnahmegesetzes.

$$A_r = \frac{(D_a^2 - D_i^2)}{D_i^2} * 100 (\%) \quad (5)$$

D_a [mm] Außendurchmesser des Entnahmegesetzes

D_i [mm] Innendurchmesser des Entnahmegesetzes

In der Tabelle 9 sind die Geometrien der verschiedenen Entnahmegерäte angegeben.

Tab. 9 Entnahmegерäte (Tanaka 2000)

Entnahmegерät	Innendurchmesser [mm]	Länge des Kolbens [mm]	Wanddicke [mm]	Flächenverhältnis [%]	Entnahmezylinder
JPN	75	1000	1.5	7.5	ja
LAVAL	208	660	4.0	7.3	nein
Shelby	72	610	1.65	8.6	nein
NGI54	54	768	1.3	54.4	ja
ELE100	101	500	1.7	6.4	ja
Sherbrooke	305*	250*	-	-	nein

* Größe der Bodenprobe

Anhand der Verlaufsforn der Kurven (siehe Abb. 10) ist die Probenqualität des Ariake Tones bei unterschiedlichen Entnahmemethoden zu erkennen (Tanaka 2000). Die Tonproben der Sherbrooke, LAVAL und JPN zeigen eine erhöhte Probenqualität, wohingegen die ELE100 und Shelby eine geringe Qualität aufweisen.

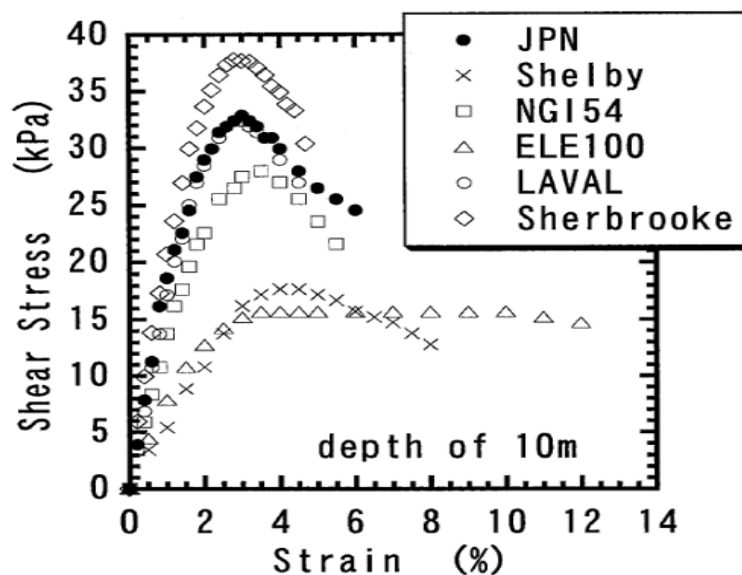


Abb. 10 Versuchsergebnisse des Ariake Tones bei unterschiedlichen Entnahmemethoden (Tanaka 2000)

In einer weiteren Studie nach Horng et al. (2010) wurden die Einflüsse der Geometrien der Entnahmegерäte auf die Qualität der Tonproben untersucht. Mit Hilfe der effektiven Restspannung (Saugspannung) p_r' und des maximalen Schubmodules G_{BE} konnten die Einflüsse der verschiedenen geometrischen Parameter, wie das Flächenverhältnis A_r , der Schneidwinkel und der Effekt eines Kolbens auf die Qualität der Probe untersucht werden. Die Versuche wurden einerseits mit den verschiedenen Entnahmegерäten an einem Bodenmodell und andererseits im Feld durchgeführt. In den folgenden Tabellen 10 und 11 sind die Kennzahlen der Modell-Entnahmegерäte und der Feld-Entnahmegерäten angegeben.

Tab. 10 Geometrien der Modell-Entnahmegерäte für den Bodenmodell (Horng et al. 2010)

Modell-Entnahme-gerät	Innendurchmesser [mm]	Schneidwinkel [°]	Wanddicke t [mm]	Flächenverhältnis [%]	Entnahmezylinder
6°M 1.5	40	6	1.5	15.6	ja
6°M 5	32	6	5	72.3	ja
30°M 1.5	40	30	1.5	15.6	ja
90°M 1.5	40	90	1.5	15.6	ja
90°M 5	32	90	5	72.3	ja
6°M 1.5 (O)	40	6	1.5	15.6	nein

Tab. 11 Geometrien der Feld-Entnahmegерäte (Horng et al. 2010)

Feld-Entnahme-gerät	Innendurchmesser [mm]	Schneidwinkel [°]	Wanddicke t [mm]	Flächenverhältnis [%]	Entnahmezylinder
6°F 1.5	75	6	1.5	8.2	ja
6°F 10	75	6	10	60.4	ja
90°F 1.5	75	90	1.5	8.2	ja
90°F 10	75	90	10	60.4	ja
6°F 1.5 (O)	75	6	1.5	8.2	nein

In der Studie nach Horng et al. (2010) wurde nach der Konsolidierung der künstlich hergestellten Bodenprobe mit einer Höhe von 30 cm die Probenentnahme mittels Modell-Entnahmegeräte durchgeführt. Danach wurden die Proben in 50 mm Stücke geschnitten, mit Plastikfolie umwickelt, mit Paraffin-Wachs beschichtet und in einem feuchten Raum bis zum geplanten Versuchstag aufbewahrt.

In den folgenden Abbildungen 11, 12 und 13 sind die Ergebnisse der Proben aus der hergestellten Bodenprobe dargestellt. Auf der senkrechten Achse ist die Distanz der Probe vom unteren Ende des Entnahmegerätes und auf der waagrechten Achse sind die Verhältnisse p'_r / σ'_{vo} und G_{BE} / G_f angegeben. Der Schubmodul G_f wurde im Feld gemessen.

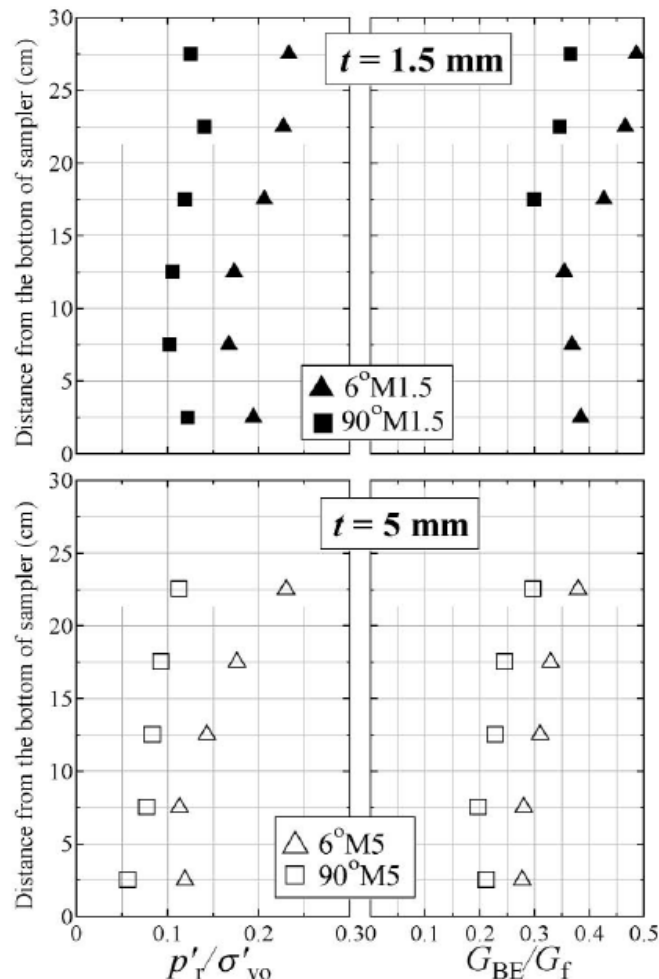


Abb. 11 Einfluss des Schneidwinkels der Modellprobe (Horng et al. 2010)

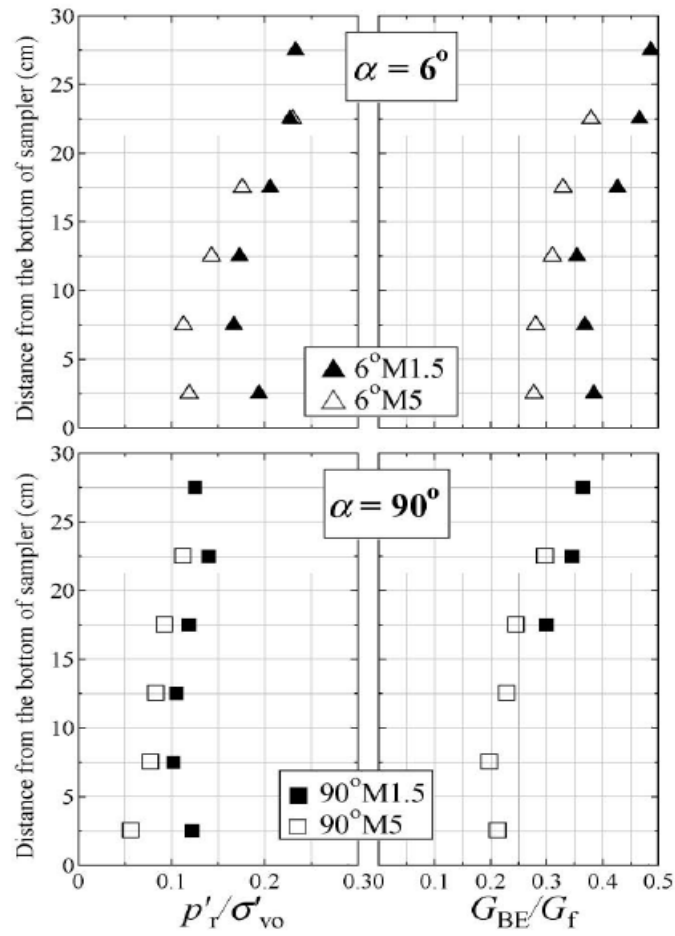


Abb. 12 Einfluss des Flächenverhältnisses A_r der Modellprobe (Horng et al. 2010)

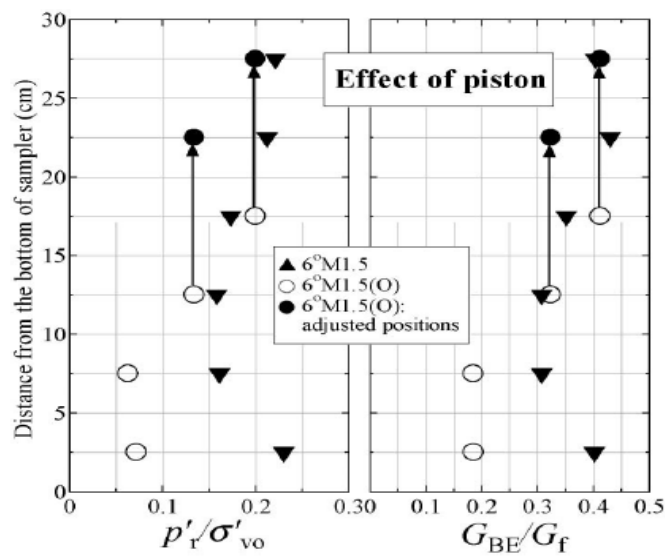


Abb. 13 Einfluss des Kolbens der Modellprobe (Horng et al 2010)

Die Ergebnisse der Versuche bei den Modellproben lassen sich wie folgt beschreiben (Horng et al. 2010).

- **Position der Probenqualität im Entnahmegerät:** In den Abbildungen 11 und 12 ist zu sehen, dass der obere Teil der Probe am wenigsten gestört ist. Das Entnahmegerät wurde ohne ein vorausgebohrtes Loch direkt in das Bodenmodell gedrückt, wodurch der obere Abschnitt der Probe ungestört blieb.
- **Einfluss des Schneidwinkels:** Entnahmegeräte mit dem kleinsten Schneidwinkel liefern zufolge der Ergebnisse in den Abbildungen 11 und 12 eine höhere Probenqualität als jene mit größerem Schneidwinkel.
- **Einfluss des Flächenverhältnisses:** Ein größeres Flächenverhältnis führt zu einer Reduzierung der Probenqualität, jedoch ist der Einfluss nicht so stark wie der Einfluss des Schneidwinkels. Daher spielt der Schneidwinkel bezüglich der Probenqualität eine größere Rolle.
- **Einfluss des Kolbens:** In dieser Studie wird das Entnahmegerät ohne Kolben mit einem O vermerkt, z.B. 6°M1.5(O). Die Gewinnungsrate der Entnahmegeräte ohne Kolben ist geringer als mit Kolben. Kolbenentnahmegräte zeigen eine höhere Probenqualität auf als Entnahmegeräte ohne Kolben.

Des Weiteren wurden in dieser Studie neben den Modellversuchen auch Feldversuche durchgeführt. In den folgenden Abbildungen 14, 15 und 16 sind die Ergebnisse der Feldproben dargestellt.

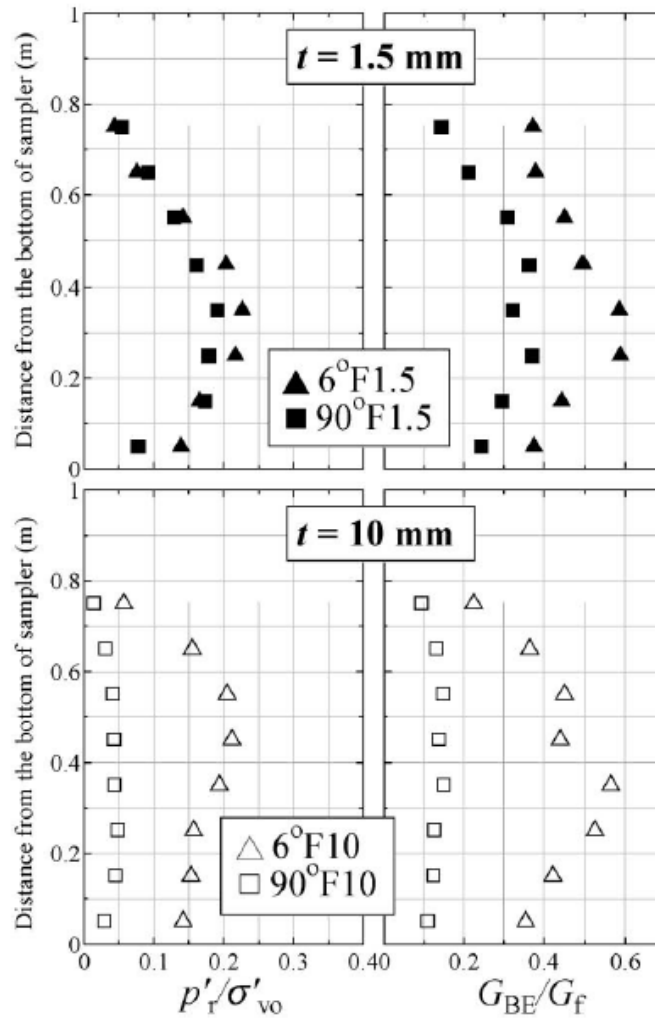


Abb. 14 Einfluss des Schneidwinkels der Feldprobe (Horng et al 2010)

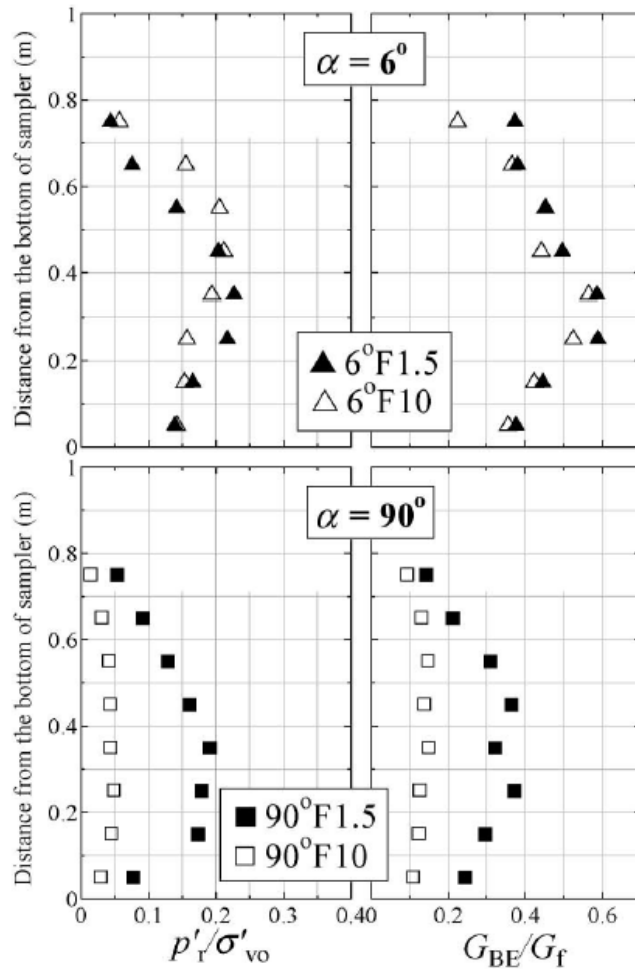


Abb. 15 Einfluss des Flächenverhältnisses A_r der Feldprobe (Horng et al. 2010)

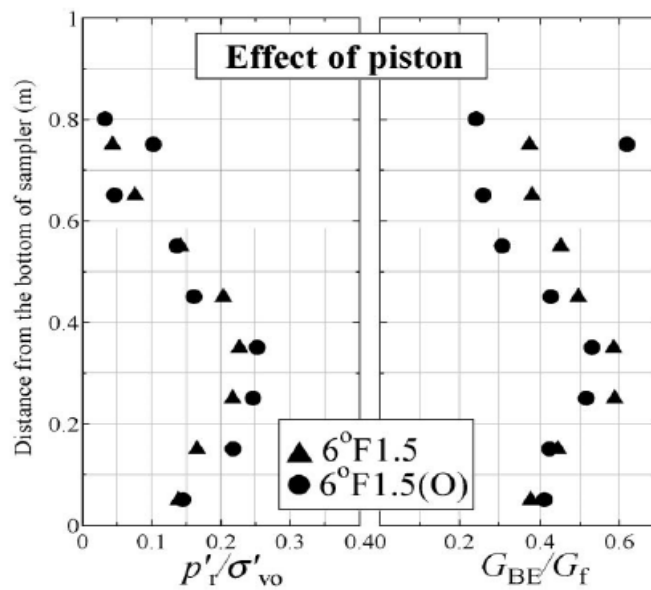


Abb. 16 Einfluss des Kolbens der Feldprobe (Horng et al. 2010)

Die Ergebnisse der Feldproben lassen sich wie folgt beschreiben (Horng et al. 2010):

- **Position der Probenqualität im Entnahmeggerät:** In den Abbildungen 14 und 15 ist zu sehen, dass die höchste Probenqualität in der Mitte ist. Die Störung auf der unteren Seite kann durch die Saugspannung bei dem Zurückziehen des Entnahmeggerätes erklärt werden. Die Störung auf der oberen Seite kann einerseits durch die Ausdehnung infolge des fehlenden Überlagerungsdruckes und andererseits aufgrund des Bohrvorganges erklärt werden.
- **Einfluss des Schneidwinkels:** Wie bei dem Modellversuch führen die Ergebnisse der Feldproben (siehe Abb.14) bei kleinerem Schneidwinkel zu einer besseren Qualität der Probe.
- **Einfluss des Flächenverhältnisses:** Ein größeres Flächenverhältnis A_r führt zufolge der Ergebnisse (siehe Abb. 15) zu schlechterer Probenqualität.
- **Einfluss des Kolbens:** Der größte Vorteil eines Entnahmeggerätes mit einem Kolben ist, dass die Gewinnungsrate der Bodenprobe sehr hoch ist. Das Entnahmeggerät erzeugt genügend Vakuum um die erfasste Probe vor dem Rausfallen während des Hochziehens zu schützen.

Die Abbildung 17 zeigt, wie eine Tonprobe um den Schneidschuh gedrückt wird, sowohl mit einer lichten Weite ICR als auch ohne ICR. In der Studie nach La Rochelle et al. (1981) sollten Kolbenentnahmeggeräte ohne ICR nach der Abbildung 17 mit größeren Durchmessern ausgeführt werden. Hinsichtlich der Größe des Durchmessers sollte es eine Begrenzung geben um die Zonen, welche durch die Saugspannung des Kolbens beeinflusst werden, gering zu halten. Bei Erhöhung des Durchmessers werden die äußeren gestörten Zonen größer, die sich auf den mittleren Abschnitt der Probe ausweiten. Damit wird der mittlere Abschnitt, wo die höchste Probenqualität vorliegt, gestört. Um dies zu verhindern sollte bei Vergrößerung des Durchmessers auch die Länge des Kolbenentnahmeggerätes erhöht werden.

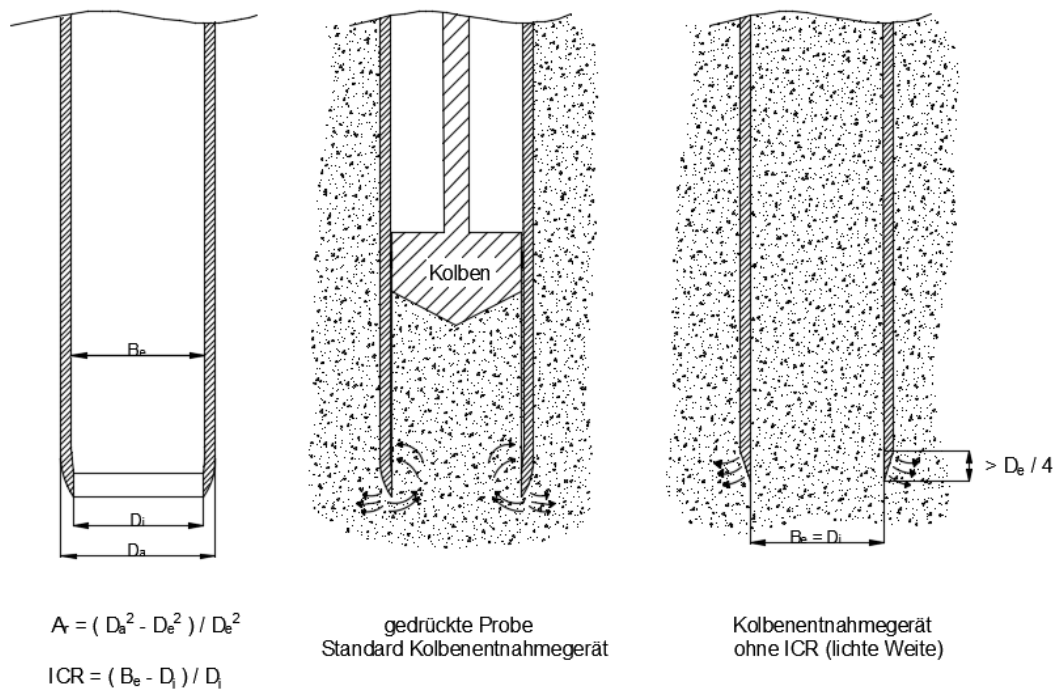


Abb. 17 Kolbenentnahmegerät mit und ohne ICR (lichte Weite) (La Rochelle et al. 1981)

1.3 Transport

Nach der Entnahme einer Tonprobe sollte die Aufbewahrung während des Transportes sorgfältig erfolgen, damit durch Bewegungen Störungen der Probe verhindert werden. Der Einfluss des Transportes auf die Probenqualität wurde in einer Studie nach Tanaka (2000) erforscht. Dabei wurden in dieser Forschung einige Tonproben unmittelbar nach der Entnahme und später am Port and Harbour Forschungsinstitut (PHRI) untersucht. In der Abbildung 18 ist zu erkennen, dass ein Einfluss des Transportes auf die Probenexemplare unbedeutend ist.

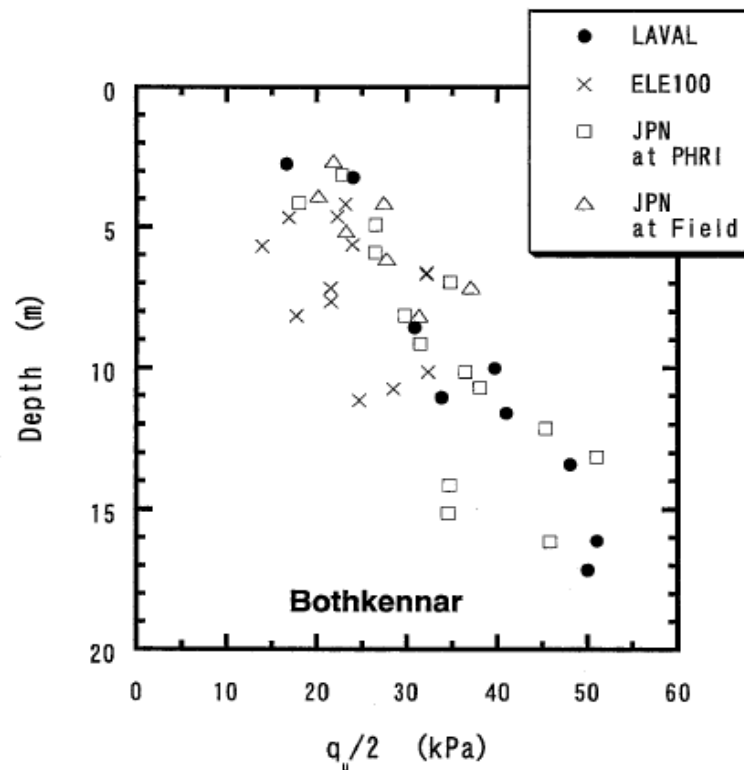


Abb. 18 Einfluss des Transportes (Tanaka 2000)

1.4 Lagerung

Werden gewonnene Tonproben nach einiger Zeit Laborversuchen unterzogen, sollte eine geeignete Beschichtungstechnik erfolgen um Alterungseffekte zu verhindern. Wenn die Proben nicht ordentlich genug verschlossen werden, entstehen Alterungseffekte auch bei keinem Verlust des Wassergehaltes. Durch diese Effekte können physiochemische und mechanische Eigenschaften verändert werden. Wenn die Probe ein paar Minuten dem Sauerstoff ausgesetzt wird, dann ist dies ausreichend um eine Alterung durch chemischen Prozess herbeizurufen. Paraffin-Wachs ist für die Aufbewahrung der Proben nicht ausreichend. Durch die Mikrorisse im Wachs gelangt der Sauerstoff an die Oberfläche des Tones. Eine Mischung aus 50 % Paraffin und 50 % Vaseline verlängert die Periode bevor erste Oxidationsanzeichen auftreten (La Rochelle et al. 1986).

Die Abbildung 19 zeigt die Veränderung der effektiven Restspannung p_r' während der Aufbewahrung einer Probe. Es ist der Einfluss der Lagerungszeit erkennbar.

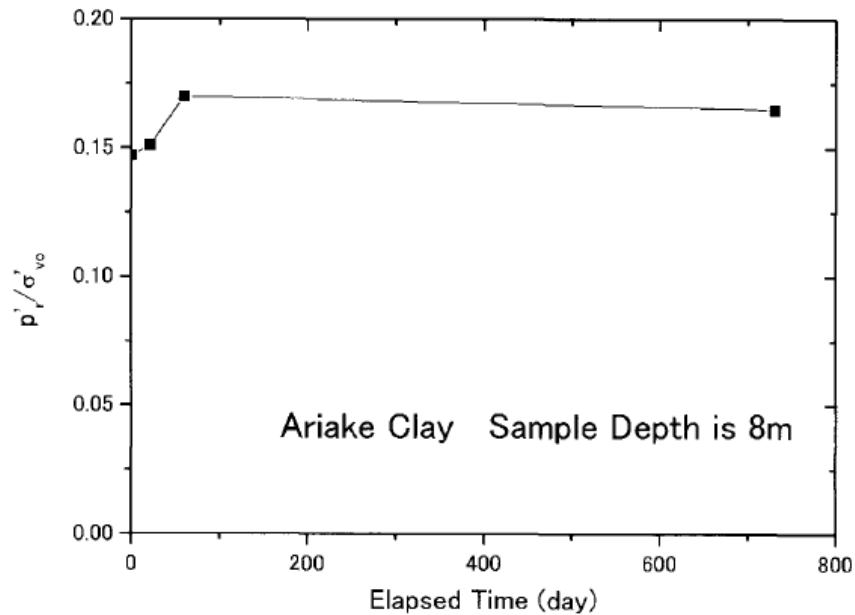


Abb. 19 Änderung des Wertes p_r' infolge der Aufbewahrung (Tanaka et al. 2006)

1.5 Bestimmung der Probenqualität

Die Beurteilung der Qualität der Probe nach der Entnahme ist ein wesentlicher Punkt um die Repräsentativität der geotechnischen Parameter wiederzugeben. Die Verfälschung der Kennzahlen infolge von verschiedenen Störungseinflüssen kann großen Einfluss auf die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit von geotechnische Konstruktionen haben. Daher ist es wichtig zu wissen, inwieweit eine Probe durch den gesamten Entnahmeprozess bis hin zu den Laborversuchen gestört worden ist. Es gibt verschiedene Indikatoren um die Qualität einer Probe beurteilen zu können. Diese sind wie folgt aufgelistet:

- Volumetrische Dehnung ϵ_{v0}
- Porenzahländerung $\Delta e / e_0$
- Steifigkeitsverhältnis M_o / M_L
- Scherwellengeschwindigkeit V_s
- Saugspannung u_r

Des Weiteren wurde in vielen Untersuchungen aus der Literatur erkannt, dass eine Störung der Probe einen direkten Einfluss auf verschiedene mechanische Eigenschaften hat (La Rochelle et al. 1986, Clayton et al. 1982). Durch eine Probenstörung stellt sich eine Destrukturierung des Bodens ein, wodurch mechanische Eigenschaften reduziert werden. Die Vorkonsolidierungsspannung wird durch die Probenstörung nicht beeinflusst und kann daher nicht als ein zuverlässiges Kriterium für die Probenqualität betrachtet werden (La Rochelle et al. 1981).

1.5.1 Volumetrische Dehnung ε_{vol} als Indikator für die Probenqualität

Andresen et al. (1979) haben als erste die Methode entwickelt, die Probenqualität über die volumetrische Dehnung ε_{vol} anzugeben. Die Qualitätsbewertung wurde zusätzlich mit einem Ranking versehen, wo die Proben je nach Größe der Dehnung von Sehr gut bis Schlecht klassifiziert werden. Eine Erhöhung der Probenstörung resultiert in einer Erhöhung der volumetrischen Dehnungen ε_{vol} bei Wiederkonsolidieren der Probe zu den in situ Spannungen.

Terzaghi et al. (1996) prägte auf der Basis der Methode von Andresen et al. (1979) den Namen Proben-Qualitäts-Einstufung (SQD = Specimen Quality Designation), die mit der Bewertung A (beste Qualität) bis hin zu E (schlechteste Qualität) versehen ist. Das von Terzaghi et al. (1996) erstellte Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Bodenproben ist in der Tab. 12 ersichtlich.

Tab. 12 Kriterien zur Beurteilung der Probenstörung (Terzaghi et al. 1996)

Volumetrische Dehnung (%)	SQD
<1	A
1-2	B
2-4	C
4-8	D
>8	E

1.5.2 Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ als Indikator für die Probenqualität

Eine weitere Bestimmung der Probenqualität kann nach Lunne et al. (1997) über die Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ erfolgen, die sich während der Wiederkonsolidierung zu σ'_{vo} einstellt. In der Beurteilung der Probenqualität wird neben der Änderung der Porenzahl e auch das Überkonsolidierungsverhältnis OCR mitberücksichtigt.

Des Weiteren werden die Proben je nach Größe der Porenzahländerung von Sehr Gut bis Sehr Schlecht klassifiziert. Mit der folgenden Gleichung 6 kann die Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ ermittelt werden, wobei eine Sättigung von 100 % angenommen wird (Amundsen et al. 2015).

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \varepsilon_{vo} * \frac{1 + e_0}{e_0} = \varepsilon_{vo} * \frac{1 + \rho_s * w}{\rho_s * w} \tag{6}$$

ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
w	[]	Wassergehalt am Anfang
ε_{vo}	[]	Volumetrische Dehnung
e_0	[]	Anfangs-Porenzahl

Das Kriterium für die Probenstörung basiert hauptsächlich auf Versuchen von marinem Ton. Dabei gilt diese Beurteilung für Proben mit einem Plastizitätsindex von 10-55%, Wassergehalt von 30 – 92 %, OCR 1-4 und einer Tiefe von 0 – 25 m. Außerhalb dieses Bereiches ist dieses Kriterium mit Vorsicht zu verwenden (Lunne et al. 2006).

Tab. 13 Kriterien zur Bestimmung der Probenstörung (Lunne et al. 1997)

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Sehr Gut-Exzellente	Gut- Mittel	Schlecht	Sehr Schlecht
1 - 2	< 0.04	0.04 - 0.07	0.07 – 0.14	> 0.14
2 - 4	< 0.03	0.03 – 0.05	0.05 – 0.10	> 0.10

1.5.3 Steifigkeitsverhältnis M_o/M_L als Indikator für die Probenqualität

Anhand der Ödometerkurve werden die Steifigkeiten M_o und M_L in ein Verhältnis gesetzt dabei ist M_o der maximale Steifigkeitsmodul im Bereich des Überkonsolidierungsverhältnisses und M_L der minimale Steifigkeitsmodul nach der Vorkonsolidierungsspannung. Die Abbildung 20 zeigt das Steifigkeitsverhältnis eines Ödometersversuches (Karlsrud et al. 2013).

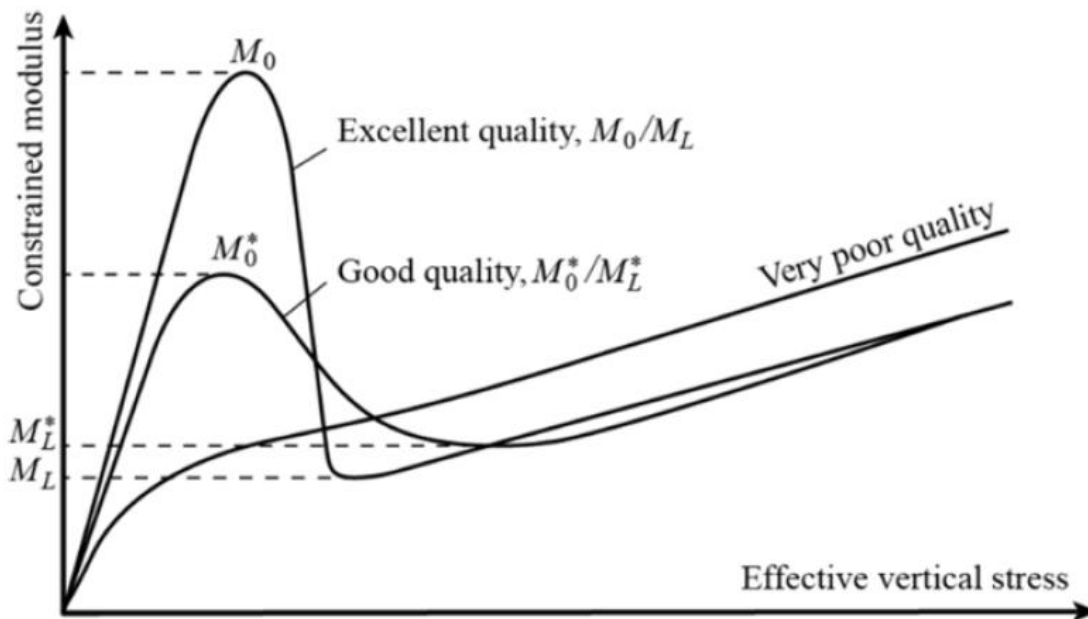


Abb. 20 Steifigkeitsverhältnis M_0/M_L für die Probenqualität (Amundsen et al. 2015)

Das Kriterium M_0/M_L ist in der Tabelle 14 dargestellt.

Tab. 14 Probenqualität zufolge des Verhältnisses M_0/M_L Amundsen et al. 2015

Probenqualität	M_0/M_L Verhältnis
Sehr gut - exzellent	> 2
Gut - Mittel	1.5 - 2
Schlecht	1 - 1.5
Sehr schlecht	< 1

In einer Studie nach Amundsen et al. (2015) wurden die Methoden Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ und das Steifigkeitsverhältnis M_0/M_L zur Beurteilung der Probenqualität verglichen. Für den Vergleich wurden Probenexemplare eines schluffigen Tons aus der Region Klett in Norwegen herangezogen. Dabei ist ein Widerspruch zwischen den beiden Kriterien bei gleichen Bodenproben zu erkennen, siehe folgende Abbildung 21.

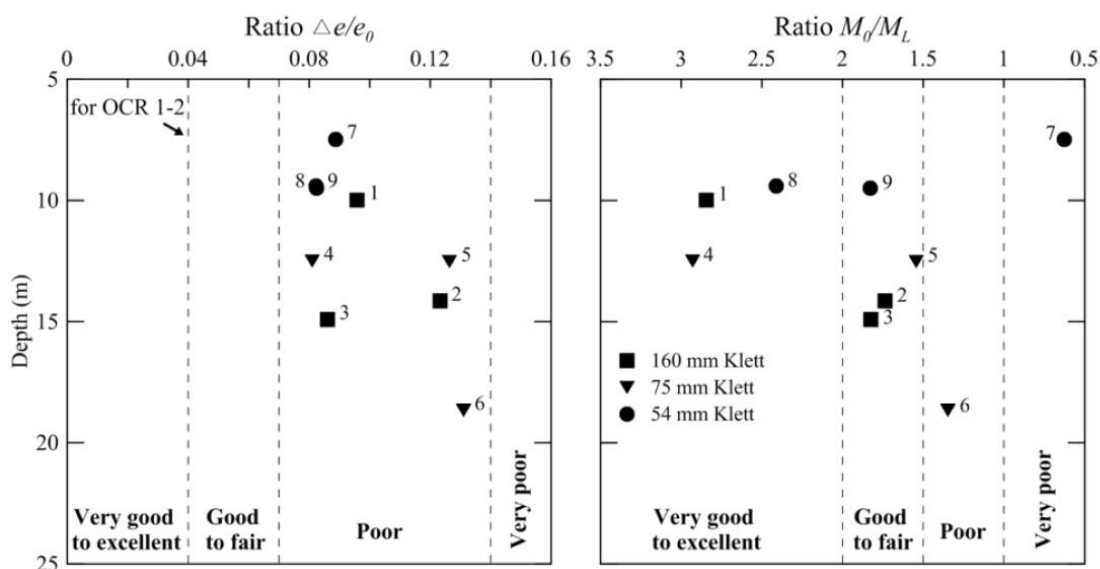


Abb. 21 Methoden der Probenbeurteilung für den Klett Ton (Amundsen et al. 2015)

1.5.4 Scherwellengeschwindigkeit V_s als Indikator für die Probenqualität

Bei dieser Art der Qualitätsbewertung einer Probe handelt es sich um eine zerstörungsfreie Methode bei der Scherwellen durch die Probe gesendet werden. In der Studie nach Long et al. (2010) kann die Bestimmung der Probenqualität über die Kombination der Scherwellengeschwindigkeit V_s mit der Saugspannung u_r erfolgen. Dabei werden die Parameter L_{vs} (Verlust der Geschwindigkeit) und L_u (Verlust der Saugspannung) für die Einstufung der Qualität der Probe mittels der Gleichungen 7 und 8 verwendet.

$$L_{vs} = \frac{V_{s\text{insitu}} - V_s}{V_{s\text{insitu}} - V_{s\text{remoulded}}} \quad (7)$$

$$L_u = \frac{0.2 \sigma'_{vo} - u_r}{0.2 \sigma'_{vo}} \quad (8)$$

V_s	[m/s]	Scherwellengeschwindigkeit
$V_{s\text{remoulded}}$	[m/s]	Scherwellengeschwindigkeit bei umgeformter Probe
$V_{s\text{insitu}}$	[m/s]	Scherwellengeschwindigkeit in Situ
u_r	[kN/m ²]	Saugspannung
σ'_{vo}	[kN/m ²]	in situ effektive vertikale Spannung

Die Abbildung 22 stellt die Einteilung der Qualitätseinstufungen für die Proben über die Scherwellengeschwindigkeit und Saugspannung dar. Für die Entnahme der Proben wurde das 54 mm Stahl-Kolbenentnahmeggerät und das 54 mm Kolbenentnahmeggerät mit einem Innenrohr aus Kunststoff verwendet.

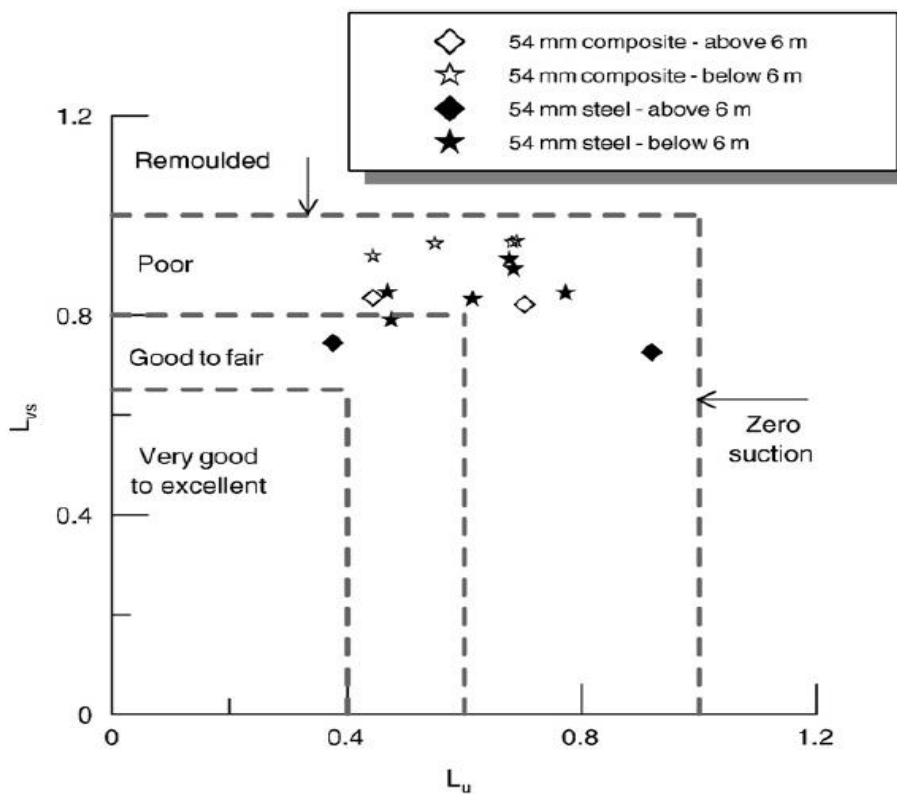


Abb. 22 Probenqualität mittels der Scherwellengeschwindigkeit und der Saugspannung (Long et al. 2010)

1.5.5 Saugspannung u_r als Indikator für die Probenqualität

Bei der Entnahme einer Bodenprobe wird der effektive Spannungszustand in dem Entnahmegesäß annähernd erhalten, infolge des Entnahmeprozesses und während des Zurückziehens des Entnahmegesäßes wird die Bodenprobe jedoch einigen Veränderungen unterworfen. Sobald die Probe im Labor herausgenommen wird verschwindet dieser Spannungszustand und infolgedessen entwickelt sich der negative Porenwasserdruck. Dieser kann sehr hohe Werte erreichen, wenn die Kapillaritätsbedingungen in dem Porenraum erhalten bleiben. Die totale Saugspannung besteht einerseits aus der osmotischen Saugspannung und andererseits aus der metrischen Saugspannung.

Die osmotische Saugspannung ist annähernd konstant und die Veränderung in der totalen Saugspannung wird durch die metrische Saugspannung verursacht (Carruba 2000).

Die Saugspannung u_r ist unter anderem abhängig von dem in situ Spannungszustand, von dem Porenraum und von den Kompressions-Eigenschaften des Bodens. Außerdem hängt der Wert u_r von den Vorgängen wie zum Beispiel Bohren, Entnahmeprozess, Transport und der Probenvorbereitung ab (Long et al. 2009).

Ladd et al. (1963) empfehlen das Verhältnis u_r / σ'_{ps} zur Beurteilung der Probenqualität, jedoch ist die Ermittlung der effektiven Spannung einer "perfekten Probe" σ'_{ps} (siehe Abb. 1) schwierig. Infolge der aufwändigen Ermittlung von σ'_{ps} wurde die Beurteilung der Probenqualität über das folgende Verhältnis u_r / σ'_{vo} untersucht (Long et al. 2009).

In einer weiteren Studie verglich Tanaka (2000) die Saugspannung u_r mit der effektiven in situ Spannung σ'_{vo} . Diese Untersuchung zeigte, dass die Werte u_r für normal konsolidierte bis leicht überkonsolidierte weiche Tone ungefähr $1/5 \sigma'_{vo}$ bis $1/6 \sigma'_{vo}$ entspricht.

Die Abbildung 23 zeigt den Zusammenhang zwischen der Saugspannung u_r und den Kriterien zur Bestimmung der Probenqualität über die Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ (Lunne et al. 1997).

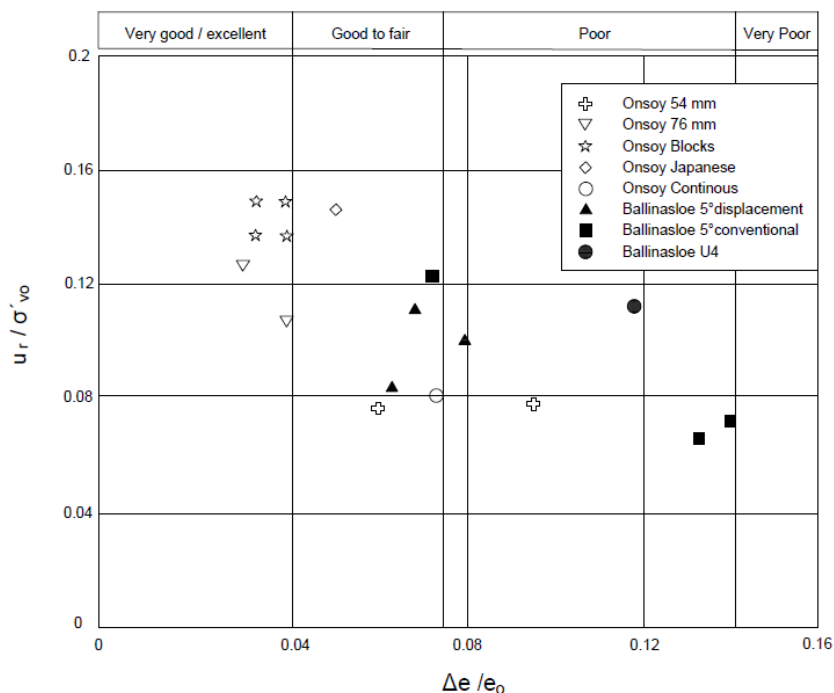


Abb. 23 Zusammenhang zwischen der Saugspannung und der Porenzahländerung (Long et al. 2009)

Es werden drei Methoden zur Bestimmung der Saugspannung beschrieben.

- Filter Papier Methode (Bulut et al. 2001)

Diese Methode zur Ermittlung der Saugspannung wurde schon in Europa im Jahr 1920 eingeführt. Mit dieser einfachen und kostengünstigen Methode können die totale und metrische Saugspannung ermittelt werden. Es werden bei dieser Methode zur Messung der Saugspannung Filterpapiere verwendet. Dabei wird das Filterpapier zur Messung der metrischen Saugspannung zwischen der Probe angebracht (direkter Kontakt mit der Probe) und zur Messung der totalen Saugspannung wird das Filterpapier oben an der Probe an einen Kunststoffring angebracht (kein Kontakt mit der Probe). Die Probe wird in einem Glas aufbewahrt um eine Verdunstung ausschließen zu können und nach einer Woche wird der Wassergehalt der Filterpapiere gemessen. Über den ermittelten Wassergehalt der Filterpapiere kann mit den vorgegebenen Kallibrationskurven (wetting curve and drying curve) die totale und die metrische Saugspannung ermittelt werden. Die folgende Abbildung 24 veranschaulicht die Methode.

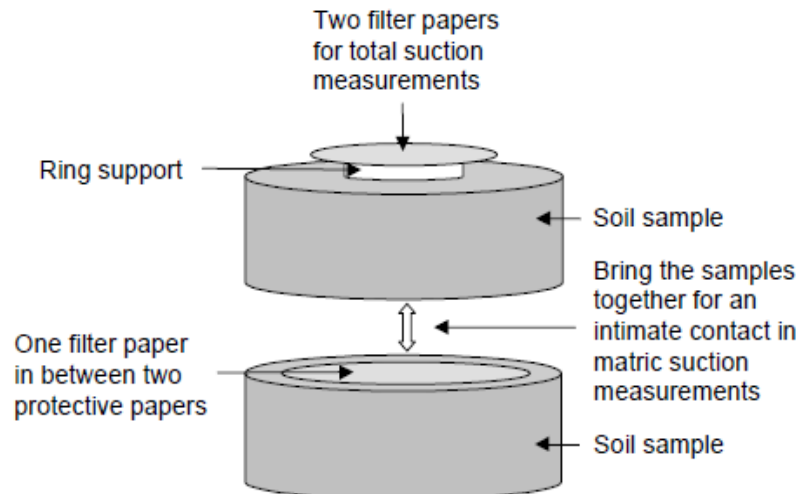


Abb. 24 Totale und metrische Saugspannung (Bulut et al. 2001)

- Druckmesszelle (Long et al. 2009)

Bei dieser Methode wird der Zelldruck σ_r in einer Triaxialzelle angebracht, welcher der totalen Überlagerungsspannung entspricht. Die Saugspannung u_r kann indirekt über den Porendruck u und den Zelldruck σ_r ermittelt werden.

$$u_r = \sigma_r - u \quad (9)$$

σ_r	[kN/m ²]	Zelldruck
u	[kN/m ²]	Porendruck
u_r	[kN/m ²]	Saugspannung

- Mini-Tensiometer (Long et al. 2009)

Dieses Gerät besteht aus einer feinporigen Keramik an der unteren Spitze, einem Wasservorrat und aus einer Messeinrichtung. Der Tensiometer wird in den Boden eingebracht und dabei wird das Wasser vom Boden angezogen. Im Inneren des Tensiometer entsteht ein Unterdruck, welcher der Saugspannung entspricht.

1.5.6 Zusammenfassung der Probenqualitätskriterien

In der Tabelle 15 ist ein Überblick über die Kriterien zur Bestimmung der Qualität von Bodenproben dargestellt, welche aus der Literaturrecherche hervorgehen.

Tab. 15 Probenqualitätskriterien aus der Literatur

Methode	Versuch	Parameter	Probenqualität				
			A	B	C	D	E
Volumetrische Dehnung ε_{vol} bei σ'_{vo}	Triaxial- u. Ödometerversuch	ε_{vol}	< 1	1-2	2-4	4-8	> 8
Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ bei σ'_{vo}	Triaxial- u. Ödometerversuch	$\Delta e/e_o$	Sehr Gut-Exzellente		Gut-Mittel	Schlecht	Sehr Schlecht
		OCR 1-2	< 0.04		0.04-0.07	0.07-0.14	> 0.14
		OCR 2-4	< 0.03		0.03-0.05	0.05-0.10	> 0.10
Steifigkeitsverhältnis M_o/M_L	Triaxial- u. Ödometerversuch	M_o/M_L	Sehr Gut-Exzellente > 2		Gut-Mittel 1.5-2	Schlecht 1-1.5	Sehr Schlecht < 1
Scherwellengeschwindigkeit V_s	Scherwellengeschwindigkeitsmessung	L_{vs}	Sehr Gut-Exzellente < 0.65				Sehr Schlecht > 0.8
		L_u	< 0.4				> 0.6
Saugspannung u_r	Filterpapier-Methode, Druckmesszelle, Mini-Tensiometer	u_r/σ'_{vo}	Sehr Gut-Exzellente 1/5 - 1/6				

1.6 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Die Entnahme einer Probe bringt Störungseinflüsse mit sich, welche mit geeigneten Entnahmemethoden und sorgfältiger Vorbereitung der Bodenprobe für die Laborversuche minimiert bzw. verhindert werden können. In vielen Studien wurde versucht diese Störungseinflüsse zu erkennen und dementsprechend zu verhindern (Hvorslev 1949, Baligh 1985, Horng et al. 2010, Tanaka 2000, Shogaki 1996). Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurden Kriterien aufgestellt um die Probenqualität zu beurteilen (Terzaghi et al. 1996, Lunne et al. 1997, Tanaka 2000, Long et al. 2010, Karlsrud et al. 2013). Einige Kriterien wie die volumetrische Dehnung ε_{vol} , Porenzahländerung $\Delta e / e_0$, Steifigkeitsverhältnis M_o/M_L , Saugspannung u_r und Scherwellengeschwindigkeit V_s eignen sich als zuverlässige Indikatoren bei der Beurteilung der Qualität einer Probe. Bei der Anwendung dieser Kriterien bei gleichen Bodenproben ist mit Diskrepanzen zu rechnen.

Der Boden variiert in seinen Eigenschaften von Region zu Region und daher zeigen gleiche Entnahmegerate bei verschiedenen Böden unterschiedliche Qualitäten auf (Tanaka et al. 2006). Des Weiteren ergeben sich bei verschiedenen Entnahmemethoden bei gleichen Böden unterschiedliche Ergebnisse (Tanaka 2000). Eine gute Probenqualität wird bei einem kleinen Schneidwinkel, mit einem kleinen Flächenverhältnis A_r , mit einer geringen Wandstärke und mit einem Kolben erreicht (Horng et al. 2010).

Die Einflüsse der Lagerung und des Transports wurden ebenfalls auf die Probenstörung untersucht. Ein Störungseinfluss des Transportes auf ein Probenexemplar konnte nicht erkannt werden (Tanaka 2000). Die Zeit der Lagerung führt zur Veränderung der effektiven Restspannung p_r' (Tanaka et al. 2006). Weitere geotechnische Parameter wie die einaxiale Druckfestigkeit q_u , die mittlere effektive Spannung p'_m und die undrained Scherfestigkeit s_u werden infolge einer Probenstörung verfälscht.

Die Wahl einer geeigneten Entnahmemethode sollte in Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Zeit bedacht werden. Eine entsprechende Lagerung sollte angestrebt werden ohne dass Alterungseffekte auftreten. Bei der Probenvorbereitung sollte fachkundiges Personal fungieren um nicht noch zusätzliche Störungen zu verursachen. Eine gute Probenqualität kann, unter Einhaltung dieser Empfehlungen aus der Literatur, erreicht werden.

2 Laborversuche zur Bestimmung der Probenqualität

2.1 Bodenproben aus St. Kanzian

In diesem Kapitel wird der Grad der Störung von natürlichen Proben (NP) und von künstlich wiederhergestellten Proben (SD) mit Hilfe der Kompressionskurven bestimmt. Die SD-Proben weisen ähnliche Parameter (Porenzahl e , Porenanteil n , Wassergehalt w , Korndichte ρ_s , Feuchtdichte ρ) wie die natürlichen Proben (NP) auf. Daher wurde versucht inwieweit die SD-Proben zu den natürlichen Proben (NP) bei veränderter Bodenstruktur abweichen. Die Schluffproben stammen aus der Region St. Kanzian am Klopeinersee im Bezirk Völkermarkt. Bei dieser Bodenart handelt es sich um einen sehr gering sandigen, stark tonigen Schluff. Die Ergebnisse stammen aus der Masterarbeit von Scheriau (2015) und werden zur weiteren Berechnung der Porenzahl e und der volumetrischen Dehnung ε_{vol} herangezogen. Zunächst werden für die Probenexemplare die Probenzahl e_i und die volumetrische Dehnung ε_{vol} bei jeder Laststufe errechnet. Bei den Ergebnissen ist nur eine Probe natürlicher Art (STK.NP.2) und alle anderen Proben aus St. Kanzian sind künstlich aufbereitete Proben (SD). Die SD Proben wurden mit der Slurry Deposition Methode künstlich aufbereitet. Bei dieser Methode wird der Boden mit entlüftetem Wasser zu einer dicken Suspension vermischt um eine homogene Probe zu erhalten (Scheriau 2015).

In der folgenden Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Bodenparameter St. Kanzian angegeben.

Tab. 16 Bodenparameter St. Kanzian (Scheriau 2015)

Probe	ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e_o	S_r
STK.NP.2	2.02	2.67	21.3	37.6	0.60	0.94
STK.SD.2	2.06	2.67	21.5	36.5	0.58	~ 1,00
STK.SD.7	2.06	2.67	21.6	36.5	0.58	~ 1,00
STK.SD.4	2.05	2.68	22.4	37.4	0.60	~ 1,00
STK.SD.4-2	2.09	2.67	19.8	34.6	0.53	~ 1,00
STK.SD.5	2.01	2.67	24.5	39.5	0.65	~ 1,00
STK.SD.5-2	2.06	2.67	21.7	36.7	0.58	~ 1,00
STK.SD.8	2.01	2.67	24.5	39.5	0.65	~ 1,00
STK.SD.8-2	2.06	2.67	21.5	36.5	0.58	~ 1,00

Einige Proben wurden mit einem automatischen Ödometer getestet und alle anderen wurden mit einem manuellen Ödometer untersucht. Der Unterschied eines automatischen Ödometers zu einem manuellen Ödometer ist die genauere Lastaufbringung, die Aufzeichnung der Zeit-Setzungslinie und einem automatischen Wechsel in die nächste Laststufe.

Proben, die mit automatischem Ödometer untersucht worden sind.

- STK.SD.7
- STK.SD.5
- STK.SD.8-2

Die Porenzahl e_i nach einer spezifischen Setzung wird mit der Gleichung 10 und die volumetrische Dehnung ε_{vol} (siehe Glg. 4) berechnet.

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) * \frac{\Delta h}{h_0} \quad (10)$$

e_0	[]	Anfangs-Porenzahl
e_i	[]	Porenzahl nach einer bestimmten Setzung
$\Delta h/h_0$	[%]	Spezifische Setzung

2.2 Probenqualitätskriterium

Die Probenqualitätskriterien können in den Abschnitten 1.5.1 und 1.5.2 nachgelesen werden. In den folgenden Abbildungen 25 – 30 werden die Porenzahl e_i und die volumetrische Dehnung ε_{vol} bis zur sechsten Laststufe dargestellt, da die Überlagerungsspannung σ'_{vo} innerhalb dieses Bereiches liegt. Der Wert σ'_{vo} wird mit der Wichte über die Tiefe näherungsweise berechnet. Mit den errechneten Werten wird die Probenqualität anhand der Diagramme dargestellt.

2.2.1 Ergebnisse der Proben (Tiefe 3.8 – 4.0 m)

Die Proben STK.NP.2, STK.SD.2 weisen zu Beginn eine annähernd gleiche Porenzahl e auf und haben einen ähnlichen Kurvenverlauf. Das Probenexemplar STK.SD.2 verhält sich in der ersten Druckstufe 10 kPa steifer, wobei nach dieser Laststufe eine deutliche Reduzierung der Porenzahl zu erkennen ist. Die Porenzahl e sowohl von STK.SD.2 und als auch von STK.NP.2 reduziert sich von der ersten bis zur letzten Laststufe um 0.09. Die Porenzahl e hingegen von STK.SD.7 wird um den Wert 0.07 kleiner. Ab der Druckstufe 80 kPa nähern sich alle drei Kurven stetig aneinander an (siehe Abb. 25).

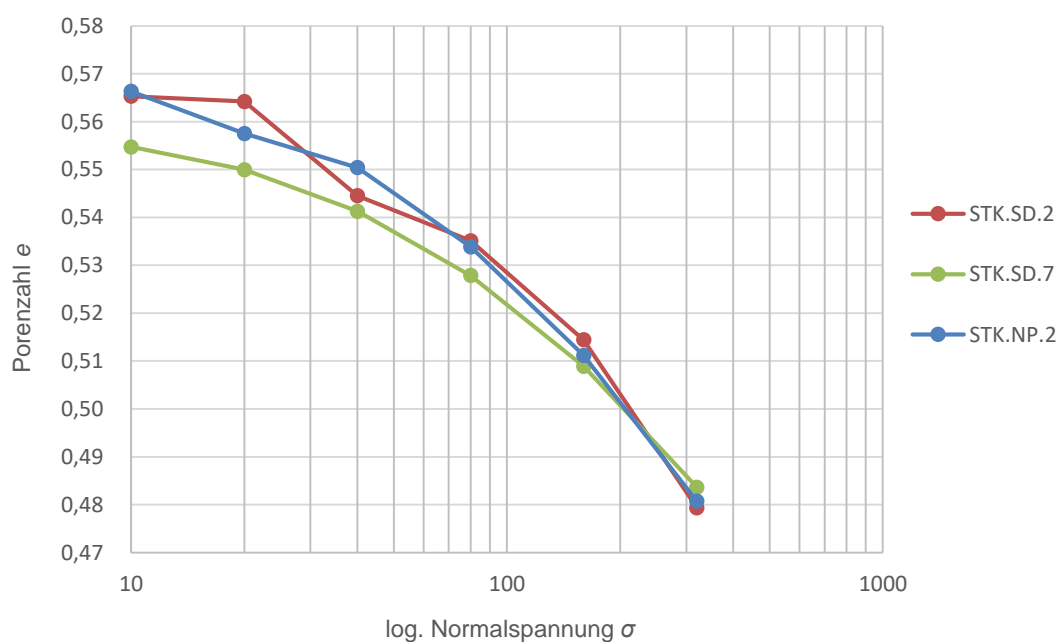


Abb. 25 σ -e Diagramm bei einer Tiefe von 3.8 - 4.0 mm

Wie in Abbildung 26 ersichtlich, hat die natürliche Probe STK.NP.2 im Vergleich zu den durchgemischten Proben STK.SD.2 und STK.SD.7 am Anfang eine größere volumetrische Dehnung ε_{vol} (Bereich 1-2%). Die Erhöhung der volumetrischen Dehnung ε_{vol} bei der Probe STK.SD.2 beträgt 5.5 % im Vergleich zu den Proben STK.NP.2 mit 5.4 % und STK.SD.7 mit 4.5 %. Der Kurvenverlauf der Probe STK.SD.2 hat bei der Laststufe 10 kPa einen Knick. Des Weiteren verlaufen die beiden Kurven STK.NP.2 und STK.SD.7 nahezu parallel.

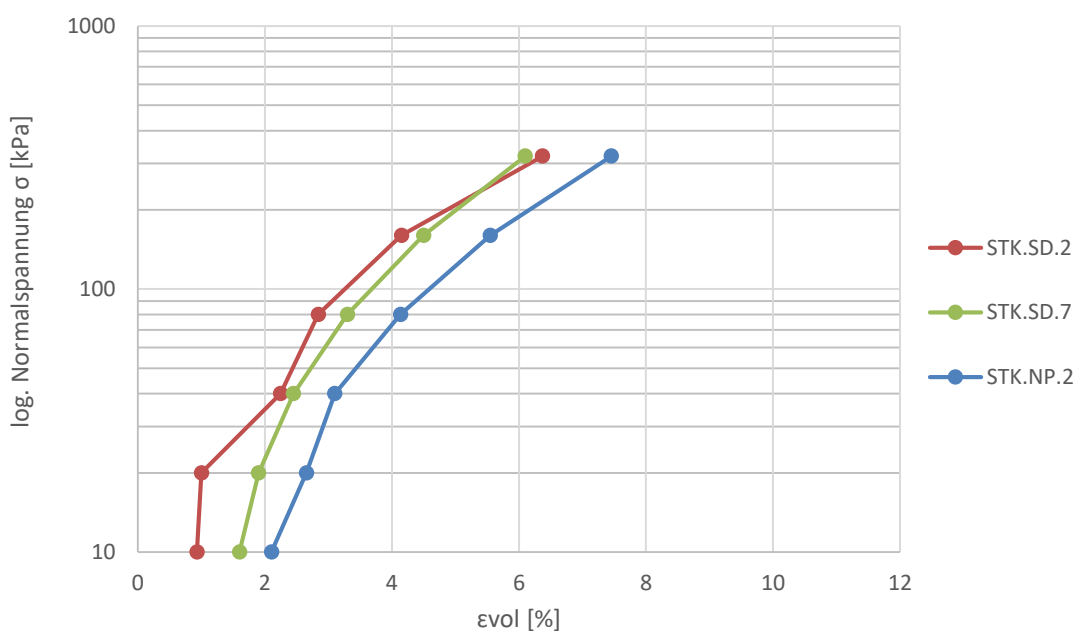


Abb. 26 σ - ε_{vol} Diagramm in einer Tiefe von 3.8 - 4.0 m

2.2.2 Ergebnisse der Proben (Tiefe 4.68 – 4.77 m)

In Abbildung 27 ist ersichtlich, dass die Kurven der Proben STK.SD.4 und STK.SD.4-2 in einem gewissen Abstand bis zur fünften Laststufe annähernd parallel verlaufen. Die Anfangsporenzahl e_0 der wiederhergestellten Probe STK.SD.4 ist mit 0.6 größer im Vergleich zu dem Probenexemplar STK.SD.4-2 mit 0.53. Jedoch beträgt die Reduzierung der Porenzahl e von der ersten bis zur sechsten Belastungsstufe bei der Probe STK.SD.4 0.08 und bei der Bodenprobe STK.SD.4-2 0.7. Somit ist bei diesen Proben während der Belastung ein nahezu ähnliches Verhalten hinsichtlich der Porenzahländerung zu beobachten.

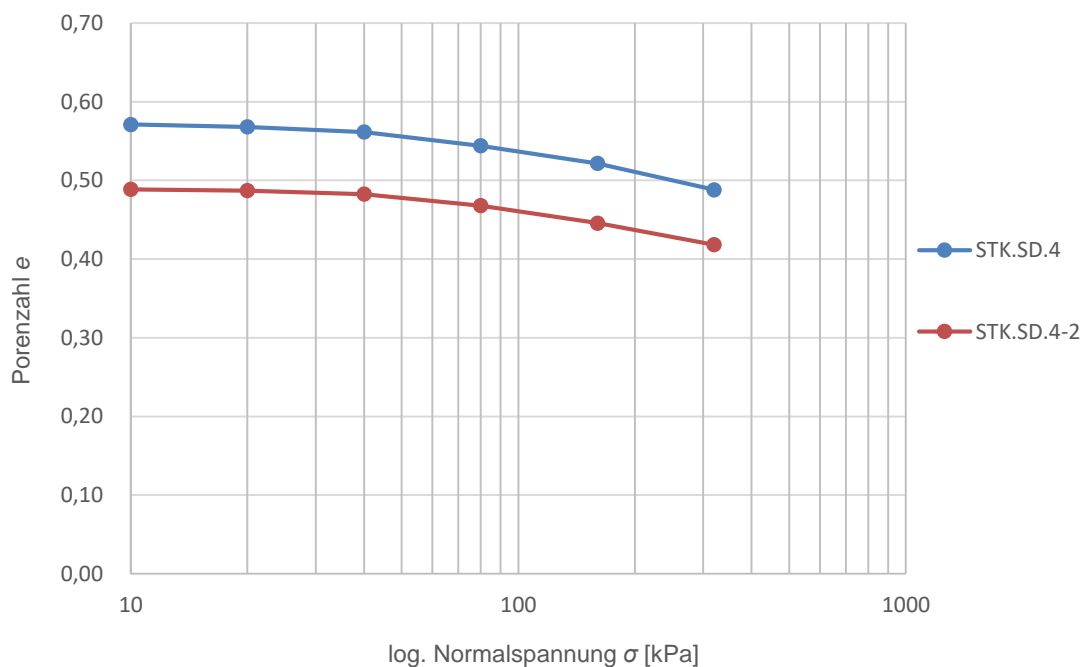


Abb. 27 σ - e Diagramm bei einer Tiefe von 4.68 - 4.77 m

An der Abbildung 28 ist zu erkennen, dass die Kurven ähnlich verlaufen, jedoch zeigt die Probe STK.SD.4 von der ersten bis zur letzten Belastungsstufe eine größere volumetrische Dehnung ε_{vol} mit 5.2 % als die Bodenprobe STK.SD.4-2 mit 4.6 %. In der dritten Druckstufe sind die beiden Kurven mit einem Knick versehen und ab diesem Punkt ist eine schnellere Erhöhung der volumetrischen Dehnung ε_{vol} zu beobachten. Mit zunehmender Belastung ist eine Annäherung der beiden Proben zu erkennen. Am Anfang der Belastung verhalten sich die Proben steifer (Druckstufe 1-3) als in den nachfolgenden Stufen (Druckstufe 3-6).

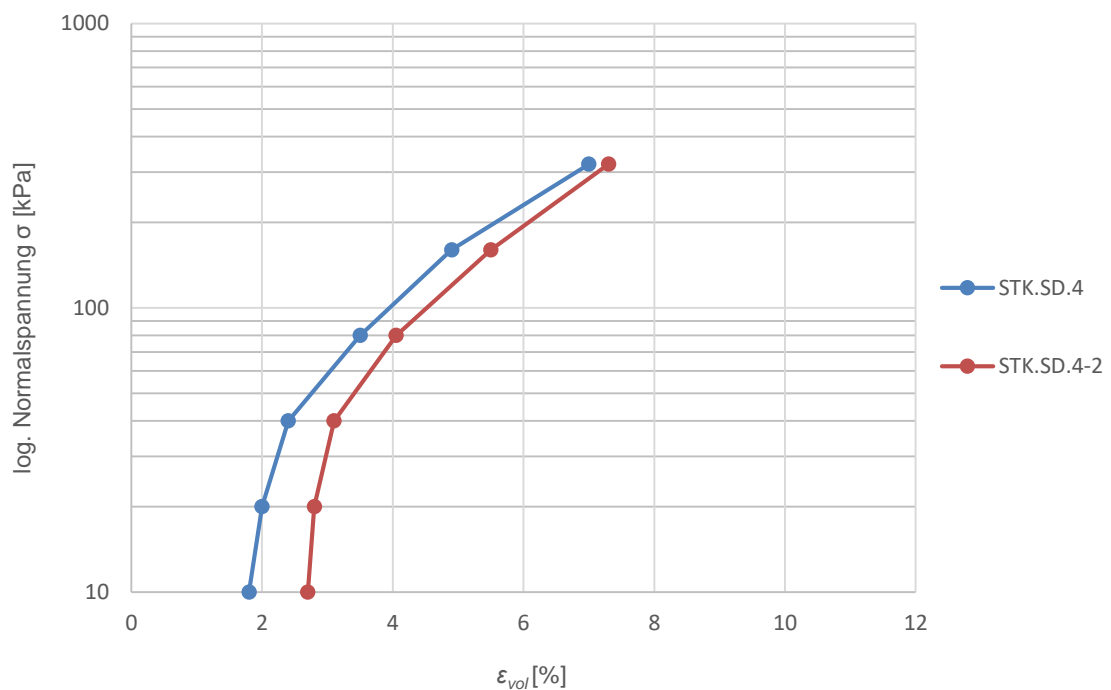


Abb. 28 σ - ε_{vol} Diagramm in einer Tiefe von 4.68 - 4.77 m

2.2.3 Ergebnisse der Proben (Tiefe 5.0 – 5.2 m)

In der Abbildung 29 ist die Porenzahl e bei jeder Druckstufe der Proben STK.SD.5-2 und STK.SD.8 von der ersten bis zur dritten Druckstufe gering unterschiedlich jedoch in weiterem Verlauf der Belastung nahezu ident. Die Abnahme der Porenzahl e von Anfang der Belastung bis zur letzten Druckstufe beträgt bei den Proben STK.SD.5 mit 0.09, STK.SD.5-2 mit 0.8, STK.SD:8 mit 0.1 und STK.SD.8-2 mit 0.07. Eine eindeutige Parallelität zwischen den vier Proben über die sechs Druckstufen ist nicht zu erkennen. Ein ähnliches Verhalten im Zuge der Belastung zeigen die Bodenproben STK.SD.5-2 und STK.SD.8.

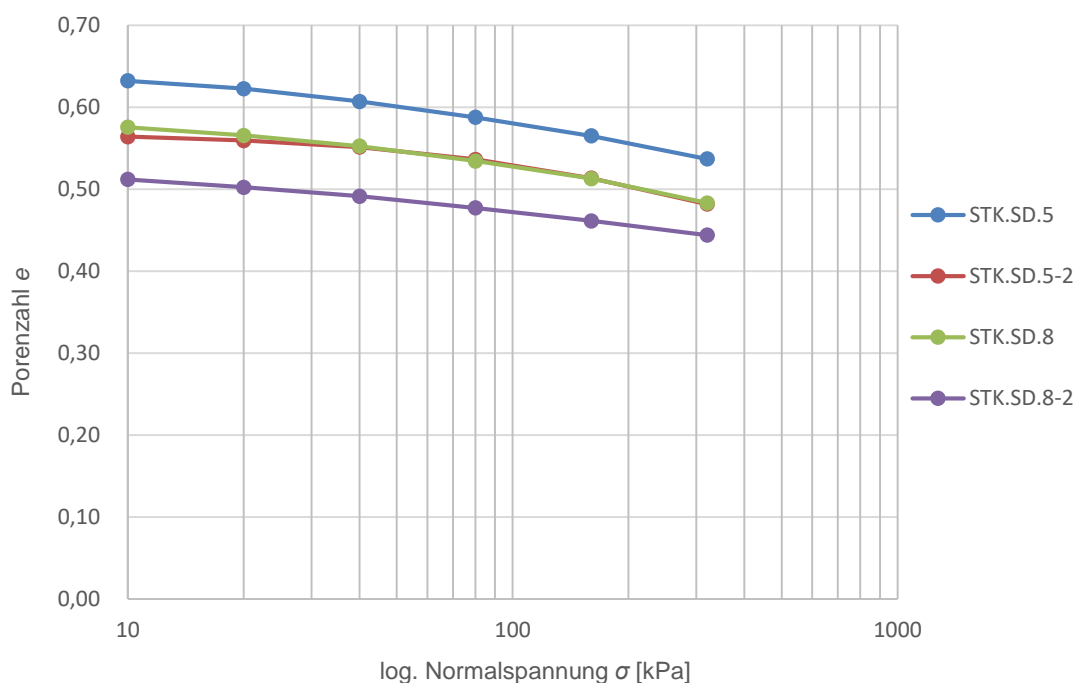


Abb. 29 σ - e Diagramm bei einer Tiefe von 5.0 – 5.2 m

In der Abbildung 30 zeigen die Kurven STK.SD.5, STK.SD.5-2, STK.SD.8 und STK.SD.8-2 unterschiedliche Verläufe. Die Kurve der Probe STK.SD.5-2 und STK.SD.8 weisen eine stärkere gekrümmte Form im Vergleich zu den Bodenproben STK.SD.5 und STK.SD.8-2 auf. Jedoch hat die Probe STK.SD.5 mit 5.6 % die größte volumetrische Dehnung ε_{vol} im Vergleich zu der Probe STK.SD.8-2 mit der kleinsten Dehnung ε_{vol} mit 4.3 % von der ersten bis zur sechsten Druckstufe.

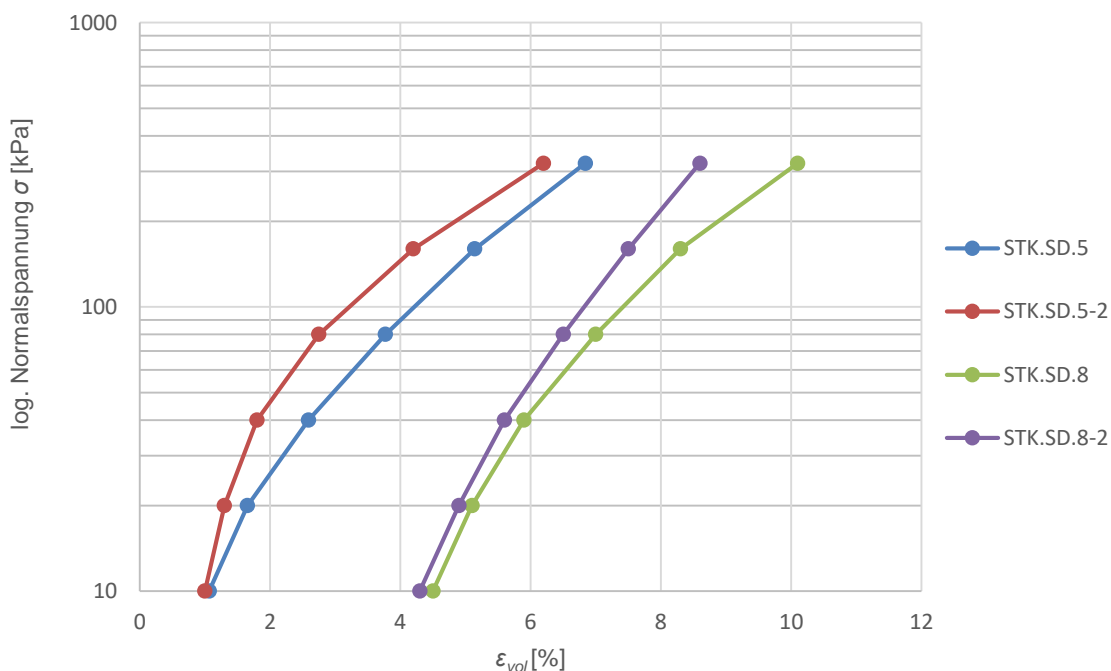


Abb. 30 σ - ε_{vol} Diagramm in einer Tiefe von 5.0 – 5.2 m

2.2.4 Gesamtdarstellung der Ergebnisse St. Kanzian

Die Schluffproben werden nach den Kriterien Lunne et al. (1997) und Terzaghi et al. (1996) sowohl über die Tiefe als auch über die effektive in situ Überlagerungsspannung σ'_{vo} dargestellt. Bei der Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ der Proben bei zunehmender Tiefe ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen (siehe Abb. 31). In Abbildung 32 ist ein Anstieg der volumetrischen Dehnung ε_{vol} bei den Probenexemplaren mit zunehmender Tiefe ebenfalls nicht eindeutig zu erkennen.

In der Abbildung 33 ist ebenfalls keine eindeutige Beziehung zwischen der Porenzahländerung $\Delta e / e_0$ und der effektiven Überlagerungsspannung σ'_{vo} zu sehen. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch bei den volumetrischen Dehnung ε_{vol} und der effektiven Überlagerungsspannung σ'_{vo} wieder, siehe Abbildung 34.

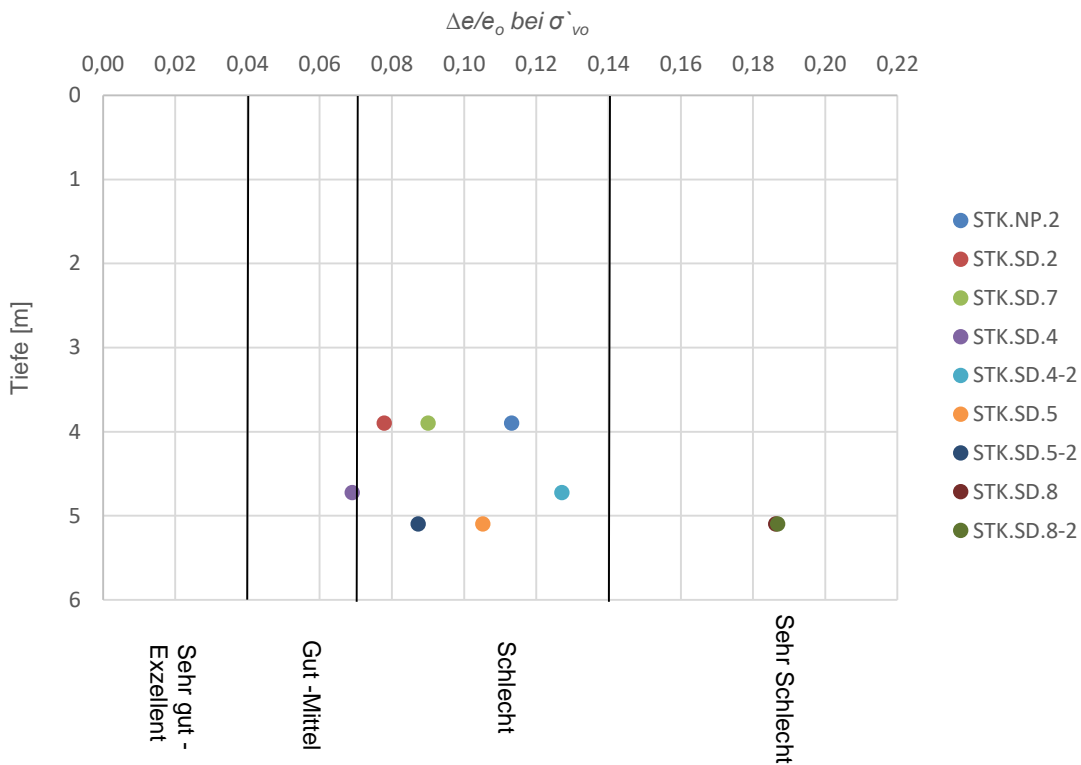


Abb. 31 $\Delta e/e_0$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei unterschiedlichen Tiefen.

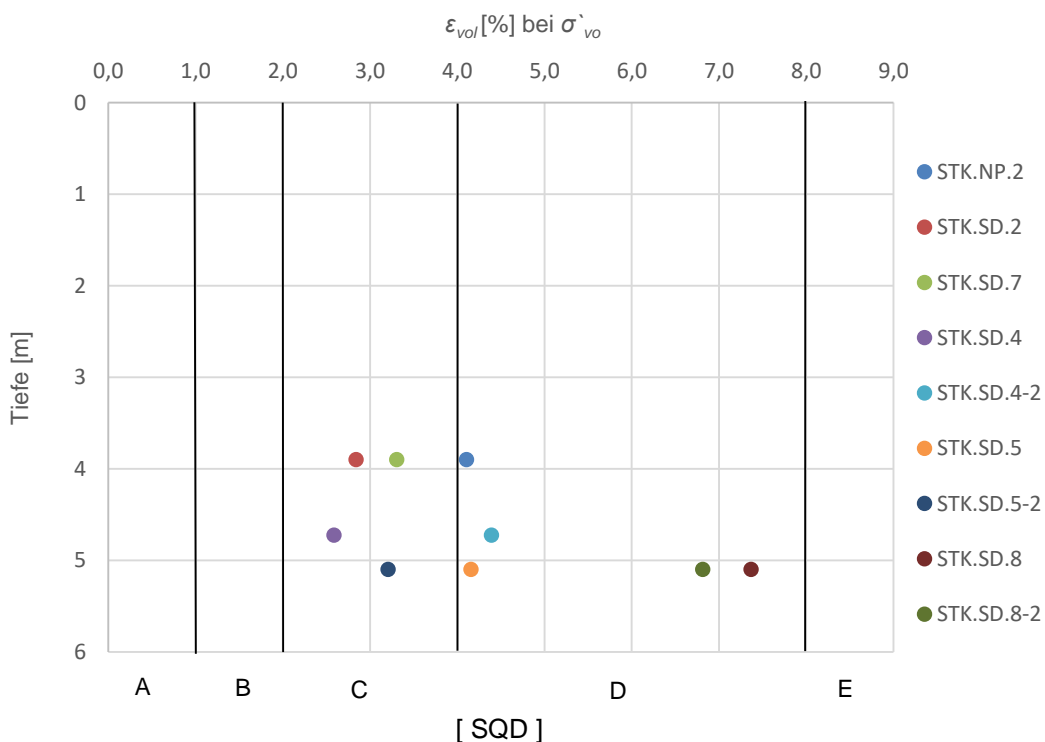


Abb. 32 ε_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei unterschiedlichen Tiefen

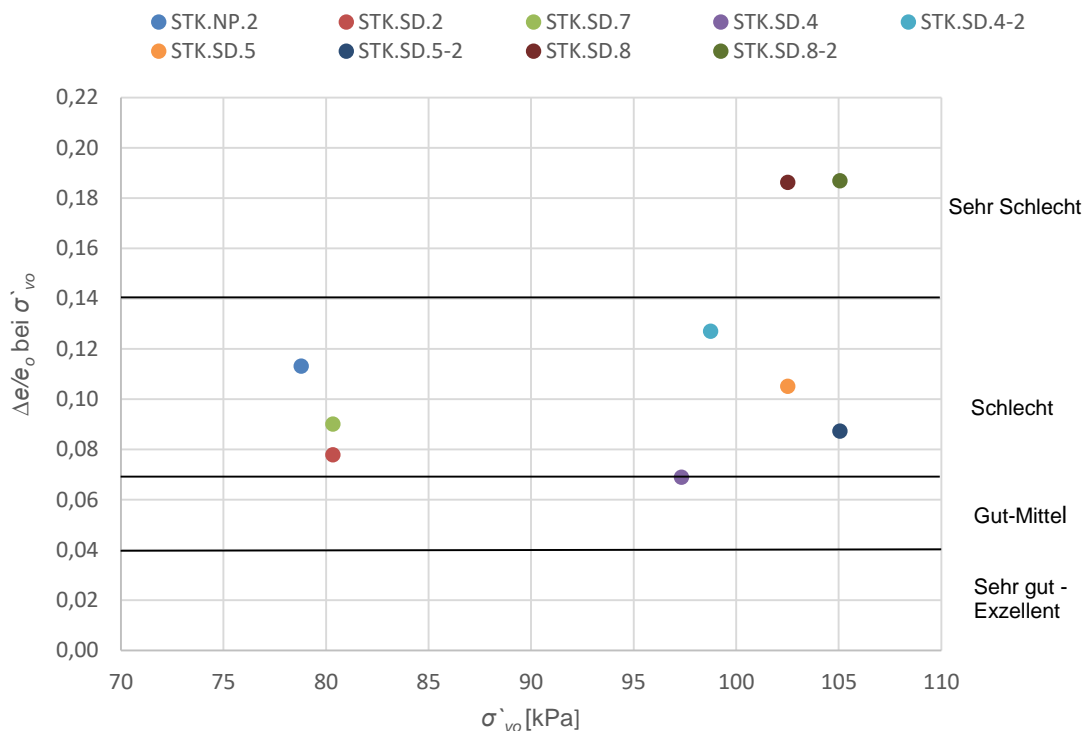


Abb. 33 $\Delta e/e_0$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei σ'_{v0}

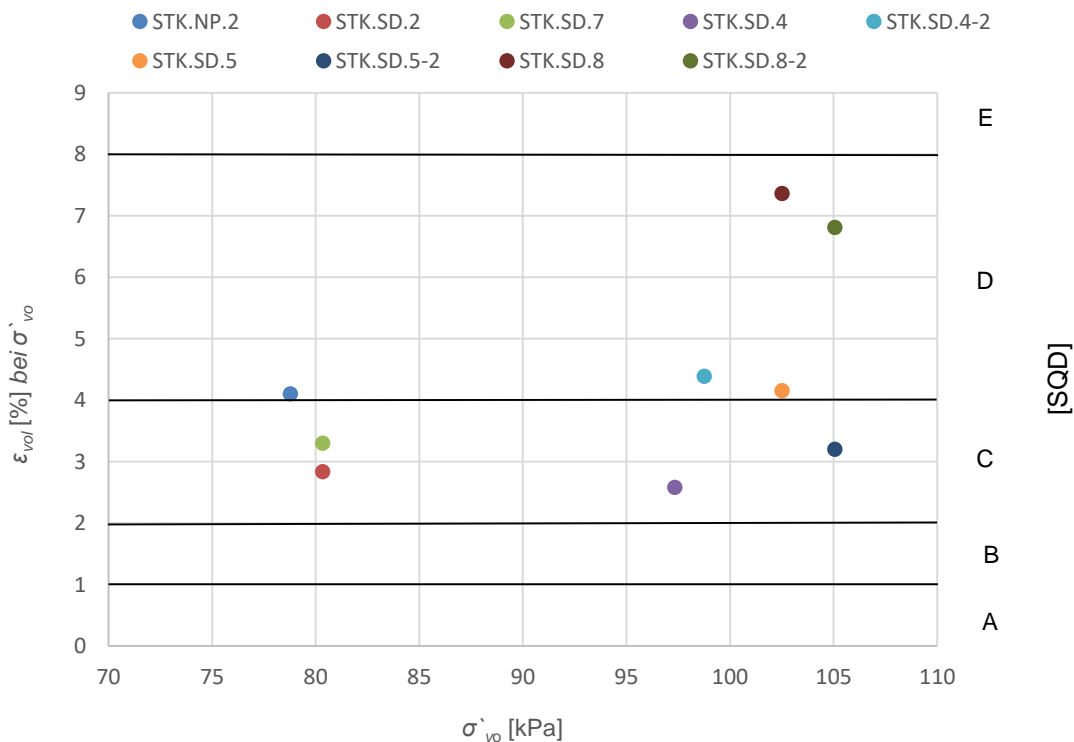


Abb. 34 ϵ_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei σ'_{v0}

2.2.5 Interpretation der Ergebnisse

Es wurden insgesamt 9 Probenexemplare mit den Kriterien nach Lunne et al. (1997) und Terzaghi et al. (1996) dargestellt. Die natürliche Probe STK.NP.2 weist zufolge den Kriterien eine schlechtere Probenqualität, im Vergleich zu den durchgemischten Proben STK.SD.2, STK.SD.7, auf. Der Unterschied zwischen der natürlichen Probe STK.NP.2 und den künstlichen Proben STK.SD.2 und STK.SD.7 ist die etwas höhere Anfangsporenzahl e_o der Bodenprobe STK.NP.2. Der niedrige Grad der Störung der wiederhergestellten Proben STK.SD.2 und STK.SD.7 im Gegensatz zu der natürlichen Probe STK.NP.2 wird womöglich durch die neu geordnete Bodenstruktur beeinflusst, wobei sich die Körner zu einer stabileren Lage umgeordnet haben. Jedoch sollte die Probenstörung der künstlich aufbereiteten Proben STK.SD.2 und STK.SD.7 größer sein als die natürliche Bodenprobe STK.NP.2, da eine Zerstörung der Bodenstruktur stattgefunden hat. In Bezug auf die Literatur von Hvorslev (1949) ist die Zerstörung der Bodenstruktur einer der Hauptursachen für die Störung von Proben (Abschnitt 1.1.1).

Die Auswertung der Proben zeigt, dass die Werte Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und die volumetrische Dehnung ε_{vol} innerhalb der Kriterien zu liegen kommen, jedoch kann eine klare Aussage über die tatsächliche Qualität der Probenexemplare nicht getroffen werden. Zwischen den beiden Methoden zur Beurteilung der Qualität von Proben ist keine Diskrepanz zu erkennen.

3 Laborversuche zur Bestimmung der Probenqualität

3.1 Bodenproben aus Ginau

Zur Beurteilung der Probenqualität wurde die natürliche Würfelprobe aus Ginau, welche in drei Bereichen (oben = G.NP.1, mitte = G.NP.2, unten = G.NP.3) geteilt worden ist und die Ginau 1/4 Probe herangezogen. Nach erfolgten eindimensionalen Kompressionsversuchen wurden an den Probenstücken die Korndichte ρ_s , Korngrößenverteilung und der Wassergehalt w ermittelt. Zuzugabe den ermittelten Parametern und den aufgezeichneten Werten aus den Versuchen wurden die Porenzahl e_i bei jeder Laststufe σ_i bestimmt. Auch wurden Ergebnisse aus der Masterarbeit von Scheriau (2015) herangezogen damit mehr Daten für die Probenqualitätskriterien zur Verfügung stehen. Dabei handelt es sich um eine natürliche Ginau Probe aus einer Stechzylinderprobe (G.NP.1.SZP) und um zwei künstlich wiederhergestellte Proben (G.SD.1.SZP und G.SD.1-2.SZP), welche mit der Slurry Deposition Methode (SD) aufbereitet worden sind.

Die Probe aus Ginau stammt ca. aus einer Tiefe von 1.0 bis 1.2 Meter. Es wird angemerkt, dass die Ginau Würfelprobe vor dem Versuch bereits länger als ein Jahr im Bodenmechanik-Labor gelagert worden ist. Die Tabelle 17 gibt einen Überblick über die Bodenparameter der Ginau Proben.

Tab. 17 Bodenparameter Ginau Würfel

Probe	ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e_o	S_r
G.NP.1	2.12	2.76	20.8	36.6	0.58	~ 1
G.NP.2	2.09	2.76	24.6	39.4	0.65	~ 1
G.NP.3	2.08	2.75	24.3	39.1	0.64	~ 1
Ginau 1/4	2.09	2.91	21.4	40.9	0.69	0.9
G.NP.1.SZP	2.00	2.78	19.3	37.2	0.59	0.87
G.SD1.SZP	1.98	2.78	26.2	41.1	0.70	~ 1
G.SD.1-2.SZP	1.90	2.78	31.6	45.8	0.85	~ 1

Bezeichnung: SZP = Stechzylinderprobe

3.1.1 Korngrößenverteilung Ginau Gesamt

Die Kornlinie der Probe G.NP.1 weicht von den anderen Linien der Proben G.NP.2 und G.NP.3 deutlich ab, obwohl die drei Exemplare aus der gleichen Würfelprobe bestehen. Die Bodenprobe G.NP.1 hat den größten Anteil an Sandkorn mit 23.1 %, hat jedoch weniger Schluff- und Tonanteil als die anderen drei Proben (G.NP.2, G.NP.3, Ginau 1/4). Im Vergleich zu den anderen drei Proben aus Ginau. hat die Bodenprobe G.NP.2 den größten Anteil an Schluff und Ton. Die Bodenproben G.NP.2 und G.NP.3 sind in ihrem Verlauf nahezu ident, welcher auf die ungefähren gleichen Anteile an Schluff und Ton der beiden Proben zurückzuführen ist. Die Kornlinie der Ginau 1/4 Probe ähnelt im Fein-Schluffbereich den anderen zwei Probenexemplare G.NP.2 und G.NP.3.

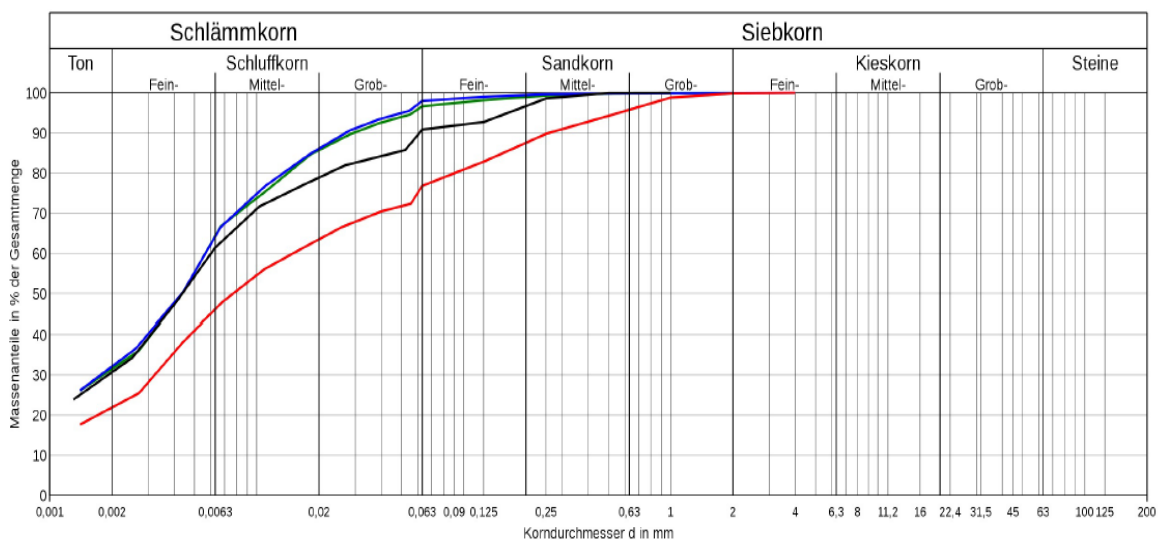






Abb. 35 Korngrößenverteilung Ginau Probe

Tab. 18 Anteile der Bodenarten Ginau Würfelprobe und Ginau 1/4 und

Probe	Legende	Bodenart	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Kies [%]
G.NP.1		cl sa Si	21.9	54.9	23.1	0.1
G.NP.2		$\bar{c}l$ Si	32.1	65.9	2.0	0
G.NP.3		sa' $\bar{c}l$ Si	31.5	65.1	3.4	0
Ginau 1/4		sa' $\bar{c}l$ Si	30.7	60.1	9.2	0

Nach der Schlämmanalyse im Bodenmechanik Labor wurde die Ginau 1/4 Probe getrocknet und am Institut für Angewandte Geowissenschaften mit einem Sedigraph genauer untersucht. Dabei werden die Partikelgrößen nach der Methode der Sedimentation, bei der die Sinkgeschwindigkeiten von unterschiedlich großen Teilchen im Schwerkraftfeld gemessen werden, bestimmt. Damit ist es möglich, eine hochauflösende Kornverteilungskurve bis in den 0.1 Mikrometer-Bereich zu erhalten. Der größte Massenanteil des Tones mit ungefähr 35 % der Ginau 1/4 Probe liegt im Mikrometer-Bereich μm 5 - 1.

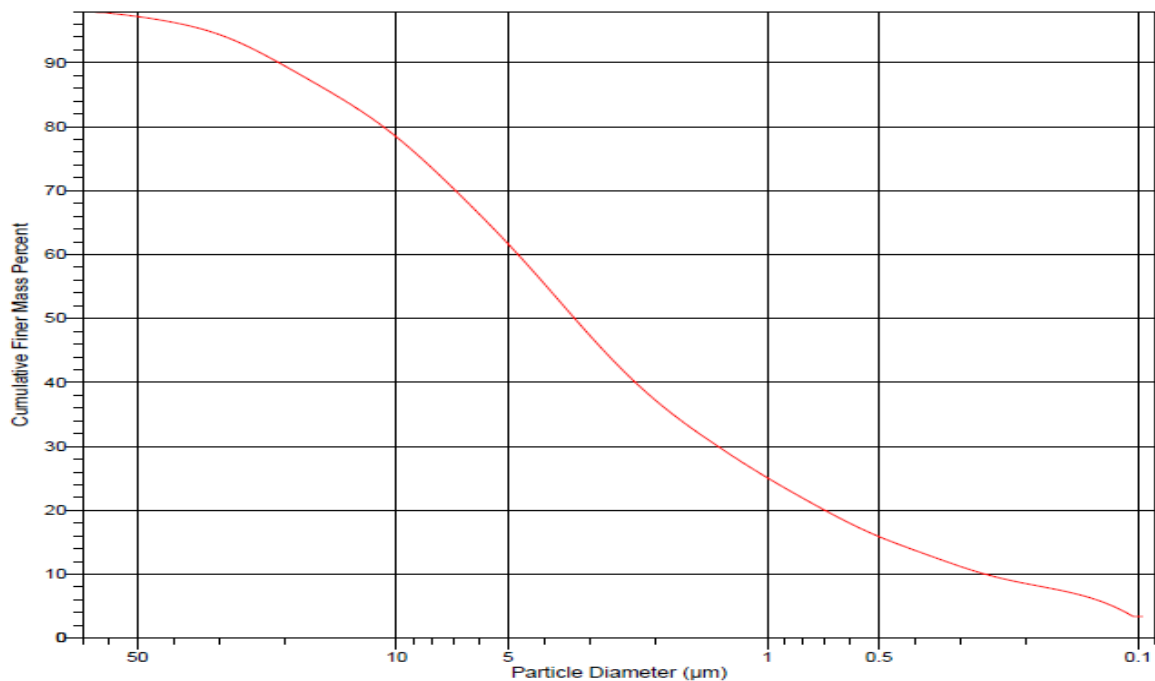


Abb. 36 Kornverteilung Ton im Mikrometer-Bereich Ginau 1/4 Probe

Die Tabelle 19 listet den Gesamtmineralbestand und Tonmineralbestand der Ginau 1/4 Probe auf, wobei diese Werte bezüglich des Gesamtmineralbestandes für die anderen Proben aus Ginau auch repräsentativ sind. Die Identifizierung und die Quantifizierung der Tonminerale wurde mit einem X-Ray Diffraktometer bestimmt.

Tab. 19 Gesamtmineralbestand und Tonmineralbestand Ginau 1/4 Probe

Gesamtmineralbestand							
Mineral	Quarz	Muskovit	Chlorit	Plakioglas	Kalifeldspat	Kalzit	Dolomit
Verteilung [%]	20	52	13	6	3	3	3
Tonmineral < 2µm [%]	-	67	33	-	-	-	-

3.1.2 Gesamtdarstellung der Ginau Proben

In der Abbildung 37 werden die Ginau Proben in dem Spannungs-Porenzahl Diagramm abgebildet. Die Spannungen am Anfang der Belastung bei den Bodenproben G.NP.1 mit 11 kPa und G.NP.3 mit 17.25 kPa sind größer als die anderen Ginau Proben mit 10 kPa. Der Grund hierfür liegt in der fehlerhaften Software der Maschine, welche am Anfang mit erhöhter Spannung anfängt, hat jedoch keinen Einfluss auf die Richtigkeit der Kurven der beiden Proben G.NP.1 und G.NP.3.

Es ist zu erkennen, dass die Proben bei unterschiedlicher Anfangsporenzahl mit zunehmender Druckstufe sich einander nähern. Die natürlichen Proben GNP.1, GNP.2, GNP.3, Ginau 1/4, G.NP.1.SZP verhalten sich zufolge den Kurven im Spannungsbereich 0 - 80 kPa steifer als die Proben mit der Slurry Deposition Methode G.SD.1.SZP und G.SD.2.SZP. Das steife Verhalten dieser Proben ist in der geringen Porenzahländerung mit zunehmender Belastung zu erkennen. Die Reduzierung der Porenzahl e von der ersten bis zur letzten Druckstufe der künstlich wiederhergestellten Bodenproben G.SD.1.SZP und G.SD.1-2.SZP ist mit 0.15, im Vergleich zu den anderen Proben G.NP.1 mit 0.06, G.NP.2 mit 0.09, G.NP.3 mit 0.07, Ginau 1/4 mit 0.09 und G.NP.SZP mit 0.07, am größten.

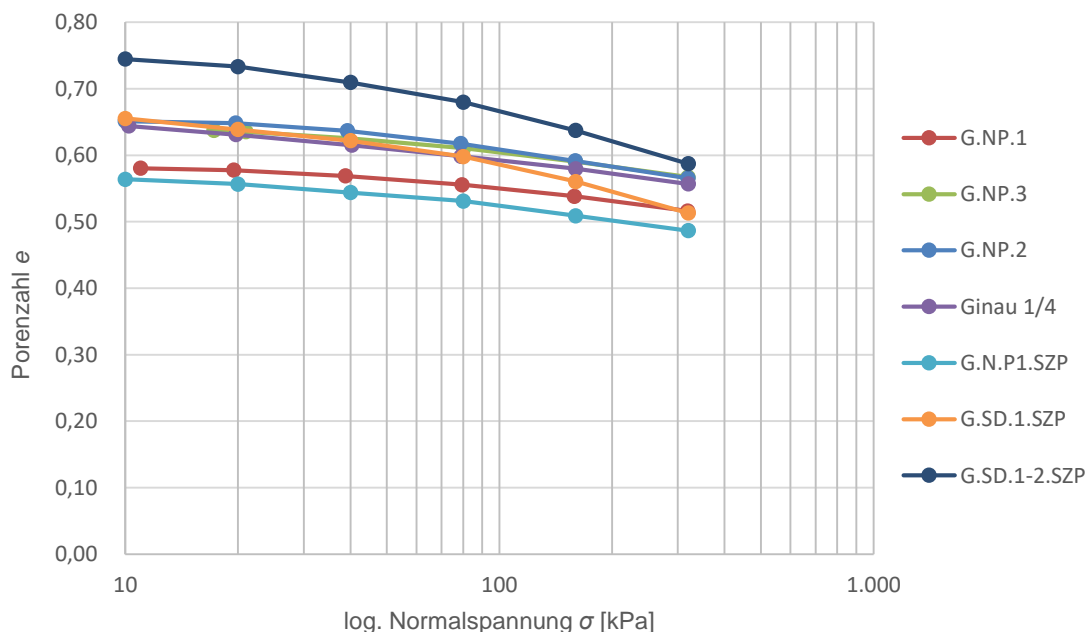


Abb. 37 $\sigma - e$ Diagramm Ginau Proben

Im volumetrischen Dehnung-Spannungs Diagramm (Abb. 38) ist zu erkennen, dass die Proben (GNP.1, GNP.2, GNP.3 und G.NP.1.SZP), welche bei der Belastungsstufe 10 kPa eine geringe volumetrische Dehnung ε_{vol} haben, mit zunehmender Belastung die Dehnung ε_{vol} verhältnismäßig gering ansteigt. Ein erhöhter Anstieg der volumetrischen Dehnung ε_{vol} von der ersten bis zur letzten Druckstufe ist bei den Proben G.SD.1.SZP mit 8.37 % und G.SD.1-2.SZP mit 8.5 % zu beobachten.

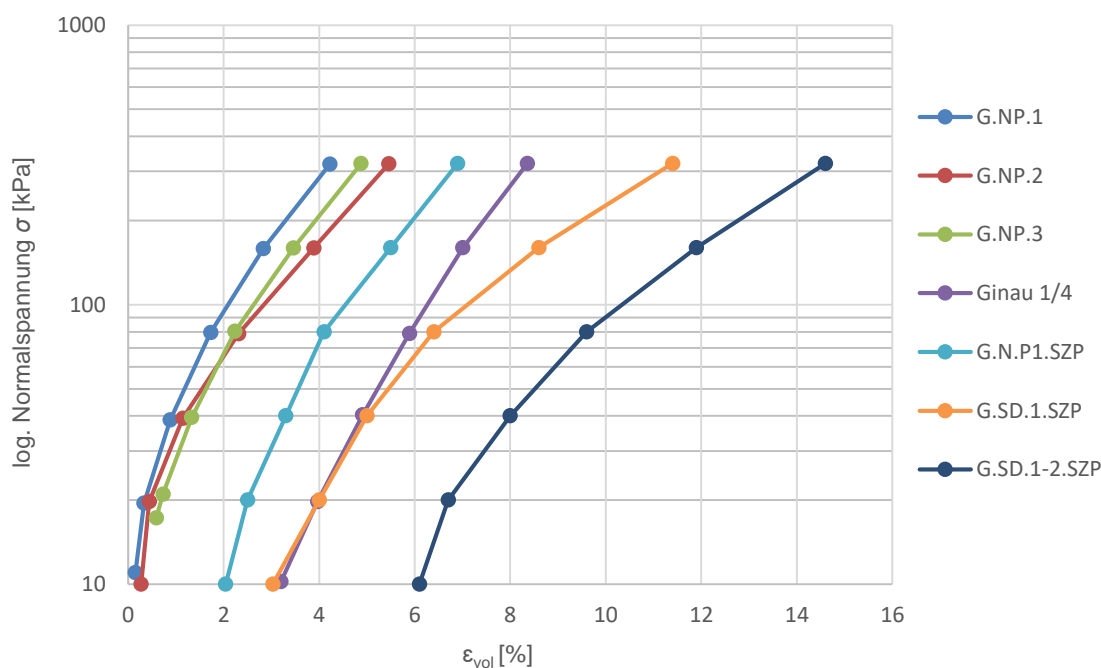


Abb. 38 ε_{vol} - σ Diagramm Ginau Proben

3.1.3 Gesamtdarstellung der Probenqualitätskriterien Ginau Proben

Die Bodenproben aus Ginau werden mit dem Kriterium der Porenzahländerung $\Delta e/e_0$ auf die Probenqualität untersucht (Abb.39). Dabei ist zu erkennen, dass die Probe G.NP1 die bessere Qualität aufweist als die anderen zwei Proben G.NP2 und G.NP3. Die Bodenproben G.NP1, G.NP2 und G.NP3 werden in der Qualitätseinstufung als Sehr Gut bis Exzellente eingestuft, wobei die Probe Ginau 1/4 im Bereich der schlechten Probenqualität zu liegen kommt. Die natürliche Probe G.NP.1.SZP und die künstlich aufbereitete Probe G.SD.1.SZP fallen bei der Beurteilung der Qualität in die Kategorie Gut-Mittel. Das Probenexemplar G.SD.1-2.SZP wird zufolge dem Kriterium der Porenzahländerung $\Delta e/e_0$ als Schlecht beurteilt.

In der Abbildung 40 werden die Bodenproben auf die Qualität mit dem Kriterium der volumetrischen Dehnung ϵ_{vol} untersucht. Die Proben aus der Würfelprobe Ginau fallen in die Kategorie A und die Probe Ginau 1/4 entspricht der Klasse C. Die Probe G.NP.1.SZP wird in der Einstufung infolge der Qualität in die Klasse B eingeordnet. Durch einen Vergleich der volumetrischen Dehnung ϵ_{vol} von natürlicher zur künstlichen Probe, fällt die natürliche Probe G.NP.1.SZP in die Einstufung B und die wiederhergestellten Proben G.SD.1.SZP in die Klasse C und G.SD.1-2.SZP in die Einstufung D.

Der Zusammenhang wurde sowohl zwischen dem Kriterium nach Lunne et al. (1997) und dem Anteil an Schluff als auch zwischen der volumetrischen Dehnung ϵ_{vol} und dem Schluffgehalt untersucht. In den Abbildungen 41 und 42 ändert sich die Beurteilung der Proben nicht und fallen in dieselben Kategorien der Qualitätseinstufung wie in den Abbildungen 39 und 40.

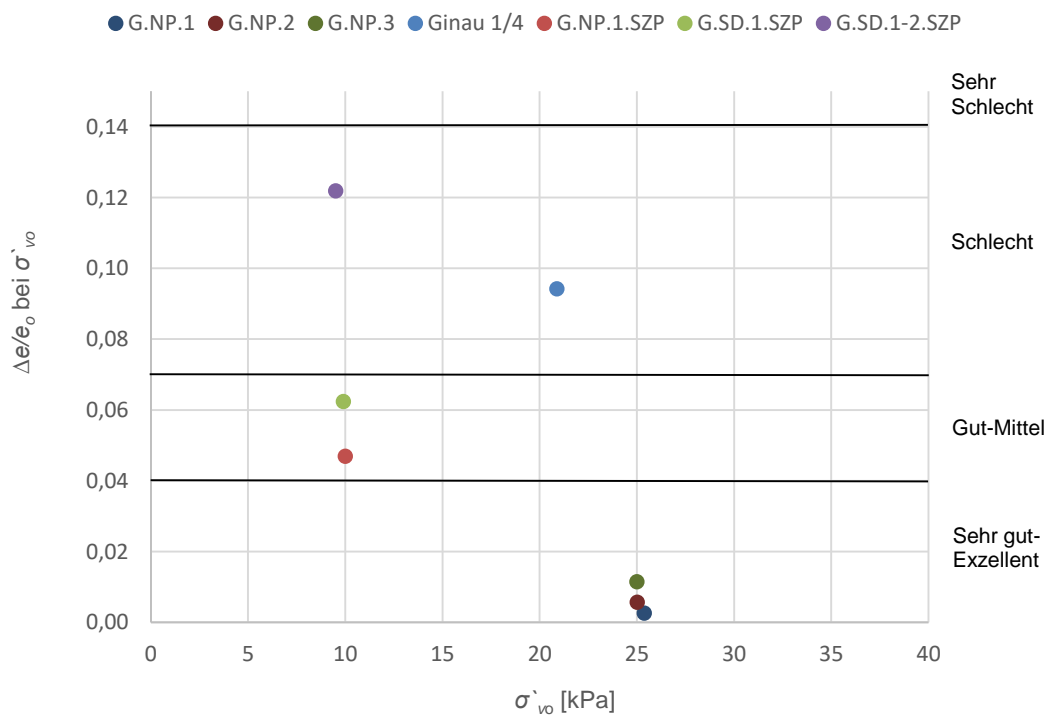


Abb. 39 $\Delta e/e_0$ -Kriterium nach (Lunne, et al., 1997) bei σ'_{vo} Ginau Proben

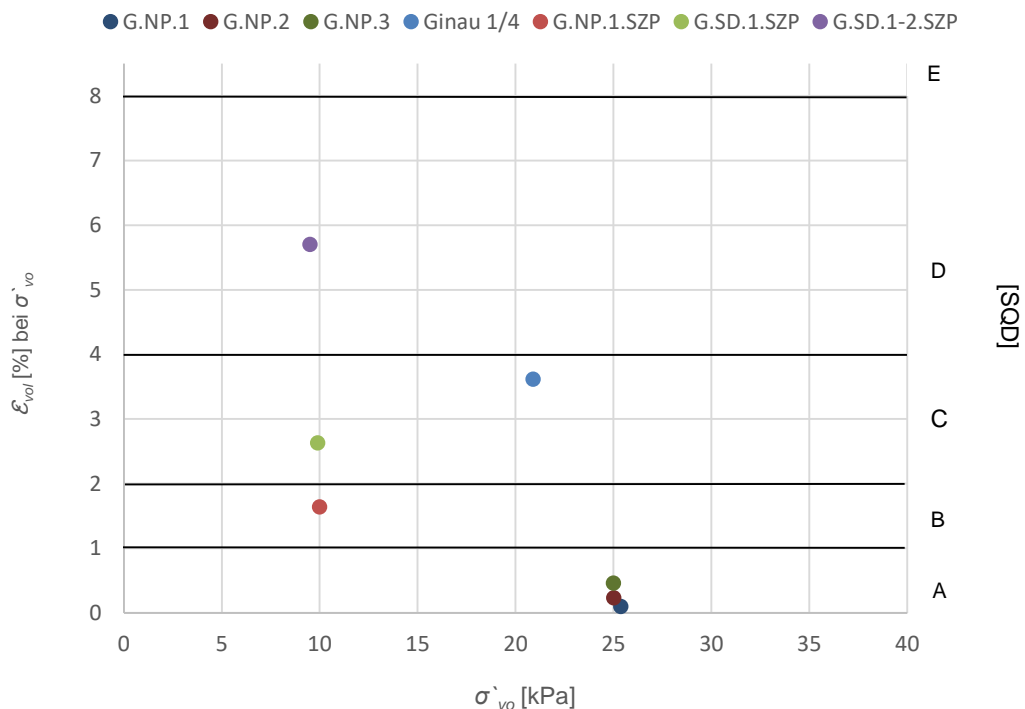


Abb. 40 ϵ_{vol} Kriterium nach (Terzaghi, et al., 1996) bei σ'_{vo} Ginou Proben

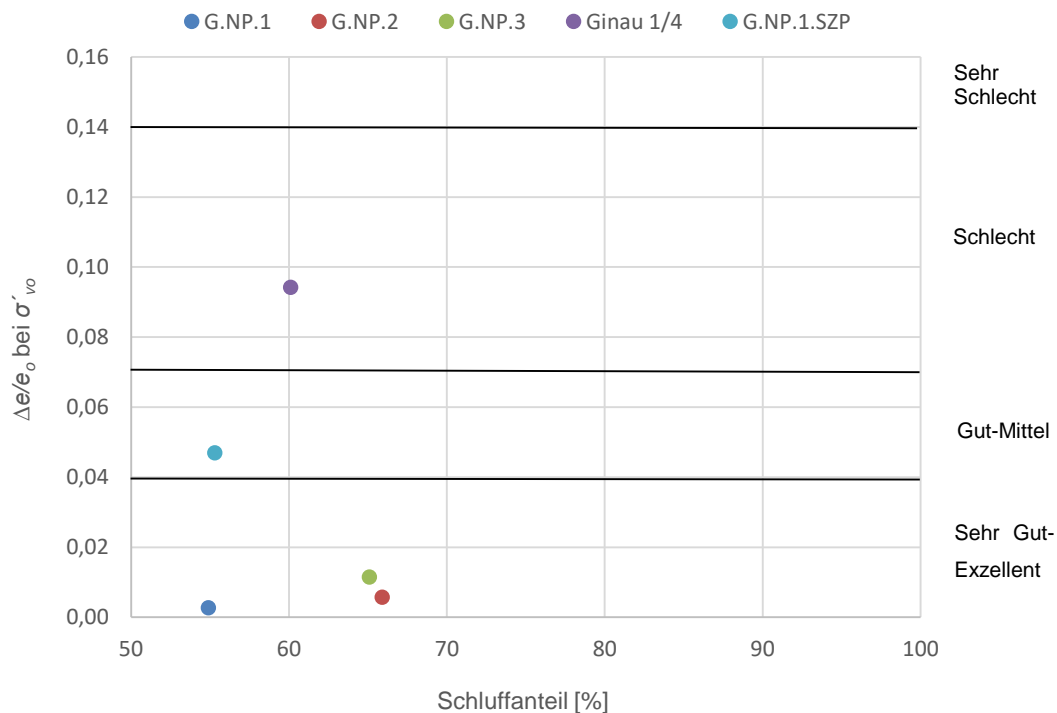


Abb. 41 $\Delta e/e_o$ -Kriterium nach (Lunne, et al., 1997) bei Schluffanteil [%]

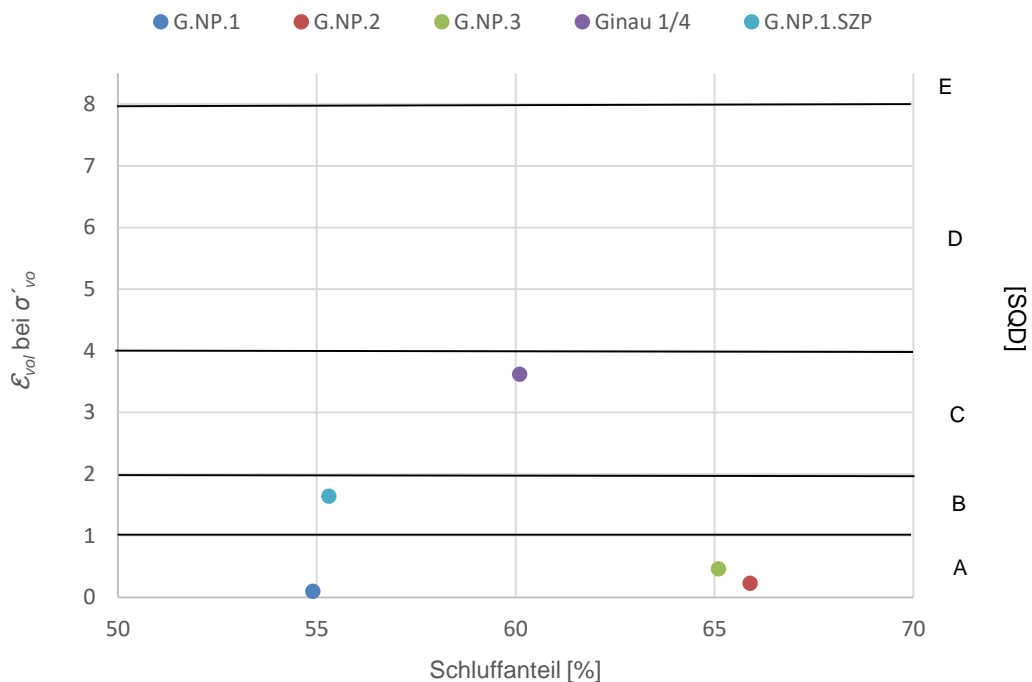


Abb. 42 ϵ_{vol} Kriterium nach (Terzaghi, et al., 1996) bei Schluffanteil [%]

3.1.4 Interpretation der Ergebnisse

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und der volumetrischen Dehnung ϵ_{vol} über die effektive Überlagerungsspannung σ'_{vo} ist nicht gegeben (Abb.39). Die Bodenproben G.NP.1, G.NP.2 und G.NP.3 weisen infolge der geringen Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ eine sehr gute Probenqualität auf.

Des Weiteren ist in der Abbildung 41 keine Verschlechterung der Probenqualität in der Darstellung des $\Delta e/e_o$ Kriteriums mit steigendem Schluffgehalt zu erkennen. Im darauffolgenden Diagramm 42 ist ebenfalls keine Besserung der Qualität von Proben mit zunehmendem Schluffanteil zu beobachten.

Die Untersuchung zeigt, dass sich keine Korrelation zwischen den Parameter ergab, dennoch kommen die Proben im Rahmen der Kriterien der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und der volumetrischen Dehnung ϵ_{vol} zu liegen. Es ist anzumerken, dass die Proben aus Ginau (G.NP.1, G.NP.2, G.NP.3 und Ginau 1/4) seit über einem Jahr im Labor gelagert worden sind und es kann daher keine Aussage darüber getroffen werden, inwieweit sich die Probe durch Alterungseffekte und die Abnahme des Wassergehaltes verfälscht hat.

3.2 Bodenprobe Hintermuhr

Die Hintermuhr-Probe stammt aus Salzburg und wurde ebenfalls wie die Ginau Probe in drei Abschnitte geteilt (oben, mitte, unten). An der Probe war eine Wachs-Beschichtung und die Beschichtung wurde erst dann entfernt, wenn ein Abschnitt der Probe mit einem Ring für den Ödometer ausgestochen worden ist. Mit dieser Vorgehensweise wurde soweit verhindert, dass die unteren Probenabschnitte in ihren Eigenschaften verfälscht werden. Nach dem Ödometerversuch wurde für jedes Probenstück die Korndichte ρ_s , die Korngrößenverteilung und der Wassergehalt w ermittelt. Mit den ermittelten Parametern und den aufgezeichneten Werten wurde die Porenzahl e_i bei jeder Laststufe σ_i bestimmt. Die Probe aus Hintermuhr stammt aus einer Tiefe von 44.1 bis 44.5 Meter.

Die Porenzahl e_i wurde bei der effektiven in situ Überlagerungsspannung σ'_{vo} ermittelt um mittels der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und der volumetrischen Dehnung ε_{vol} die Qualität der Proben zu beurteilen. Der Zusammenhang sowohl zwischen dem Kriterium nach Lunne et al. (1997) und dem Anteil an Schluffanteil als auch zwischen der volumetrischen Dehnung ε_{vol} und dem Anteil an Schluffanteil wurde ebenfalls untersucht. Der Wert σ'_{vo} wurde mit der Wichte unter Auftrieb γ' über die Tiefe näherungsweise berechnet. In der Tabelle 20 sind die Bodenparameter der Hintermuhr-Proben angegeben.

Tab. 20 Bodenparameter Hintermuhr-Probe

Probe	ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e_o	Sr
HM.NP.1	1.96	2.76	28.5	45.5	0.83	~ 1
HM.NP.2	2.01	2.75	27.9	43.3	0.76	~ 1
HM.NP.3	1.98	2.76	27.6	43.6	0.77	0.98

Bezeichnung

- HM.NP.1 natürliche Hintermuhr-Probe oben
- HM.NP.2 natürliche Hintermuhr-Probe mitte
- HM.NP.3 natürliche Hintermuhr-Probe unten



Abb. 43 Hintermuhr-Probe bei der Bearbeitung

3.2.1 Korngrößenverteilung Hintermuhr-Probe

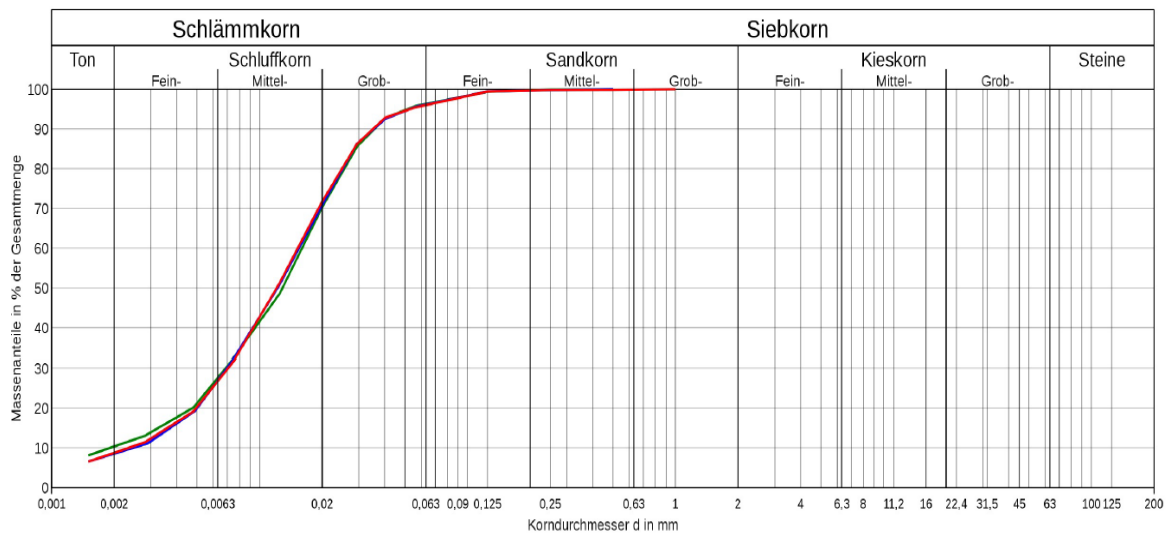


Abb. 44 Korngrößenverteilung Hintermuhr

Bei der Korngrößenverteilung Hintermuhr verhalten sich die Kornlinien der drei Abschnitte der Würfelprobe über die gesamte Korngrößenverteilung nahezu ident.

Tab. 21 Bodenarten Hintermuhr-Probe

Probe	Legende	Bodenart	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Kies [%]
HM.NP.1		sa ⁴ cl ¹ Si	10.3	86.0	3.7	0
HM.NP.2		sa ⁴ cl ¹ Si	8.5	87.6	3.9	0
HM.NP.3		sa ⁴ cl ¹ Si	8.7	87.3	4.0	0

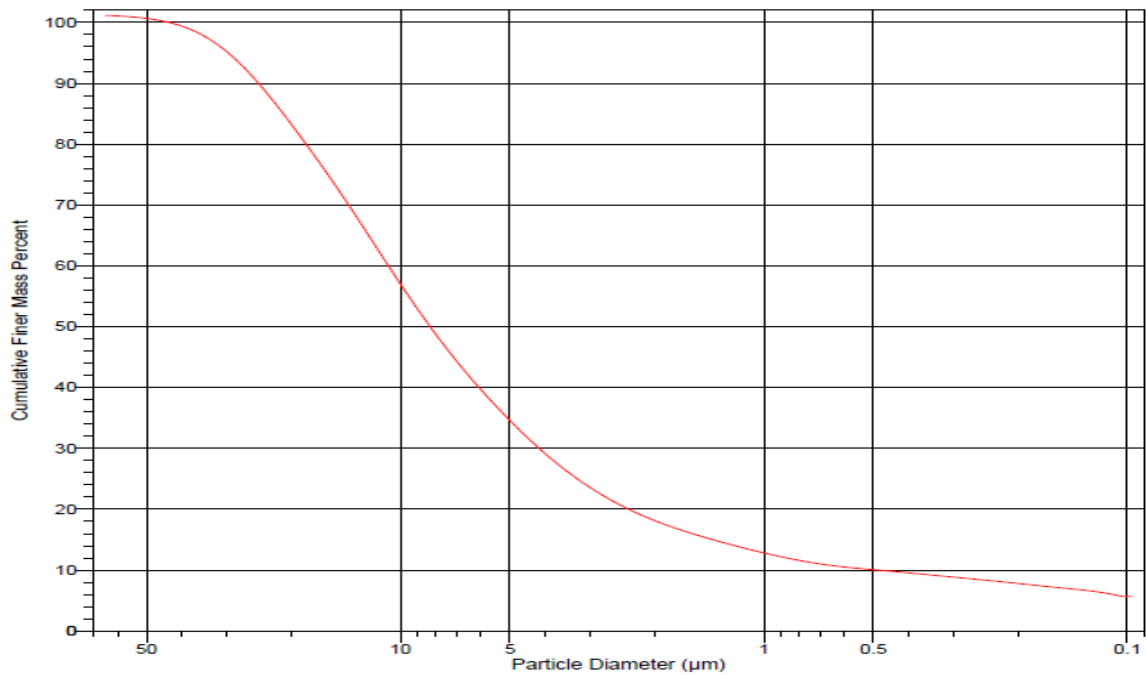


Abb. 45 Kornverteilung im Tonbereich Hintermuhr-Probe

Die Hintermuhr-Probe wurde ebenfalls mit einem Sedigraph auf den Tongehalt im Mikrometer-Bereich genauer untersucht. Der Graph hat im Bereich 50 – 10 µm, welcher auch ungefähr 42 % des Masseanteils des Tones erfasst, einen steilen Verlauf und wird zu Ende hin flacher (Abb.45).

3.2.2 Gesamtdarstellung der Hintermuhr-Probe

In der σ - e Abbildung 44 gleichen sich die drei Kurven der Bodenproben aus Hintermuhr in ihrer Verlaufsform über die gesamte Belastungsdauer. Bis auf einen Unterschied der initialen Porenzahlen e zeigt der Ent- und Wiederbelastungsverlauf ein nahezu identes Verhalten. Die Abnahme der Porenzahl e über die 13 Druckstufen beträgt für die beiden Proben HM.NP.1 und HM.NP.2 0.12. Der untere Abschnitt der Hintermuhr Würfelprobe HM.NP.3 hat eine Reduzierung der Porenzahl e von der ersten bis zur letzten Belastungsstufe von 0.1.

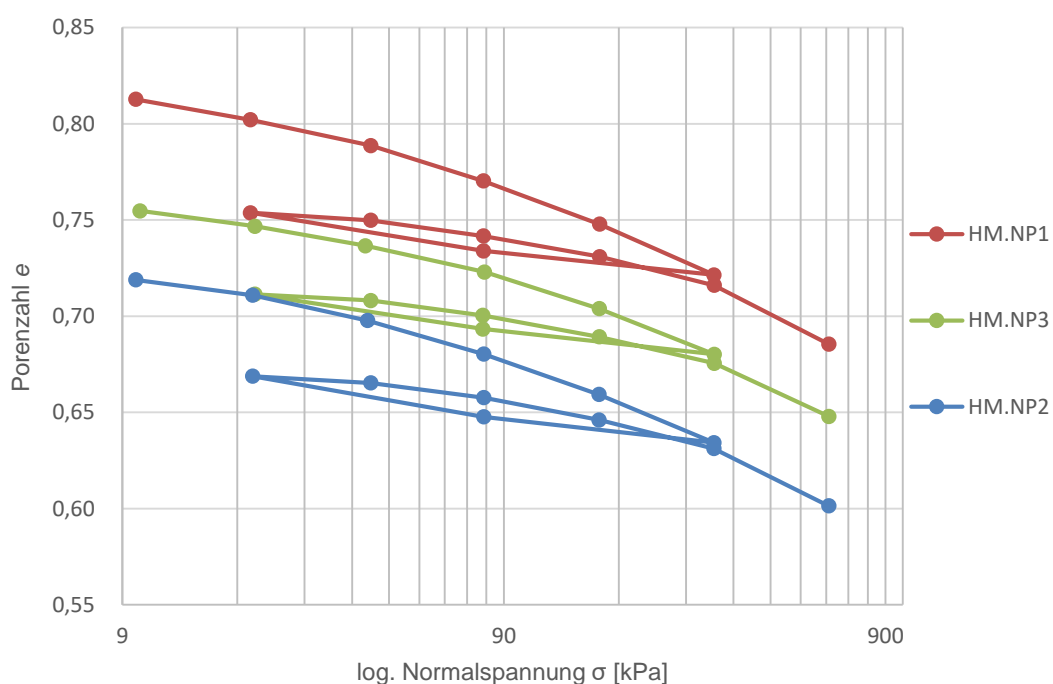


Abb. 46 σ - e Diagramm Hintermuhr-Probe

Im Diagramm $\varepsilon_{vol} - \sigma$ (Abb.47) ist eine Parallelität zwischen den Proben HM.NP.1 und HM.NP.2 zu erkennen. Die Proben HM.NP3 und HM.NP1 haben bei der ersten Druckstufe eine ungefähr gleiche volumetrische Dehnung ε_{vol} . Mit zunehmender Belastung wird der Abstand des Probenexemplars HM.NP.3 und der Probe HM.NP1 größer. Die Bodenprobe HM.NP.1 hat die größte volumetrische Dehnung ε_{vol} mit 6.9 % im Vergleich zu den anderen Proben HM.NP.2 mit ε_{vol} 6.6 % und HM.NP.3 mit 6.0 % ε_{vol} .

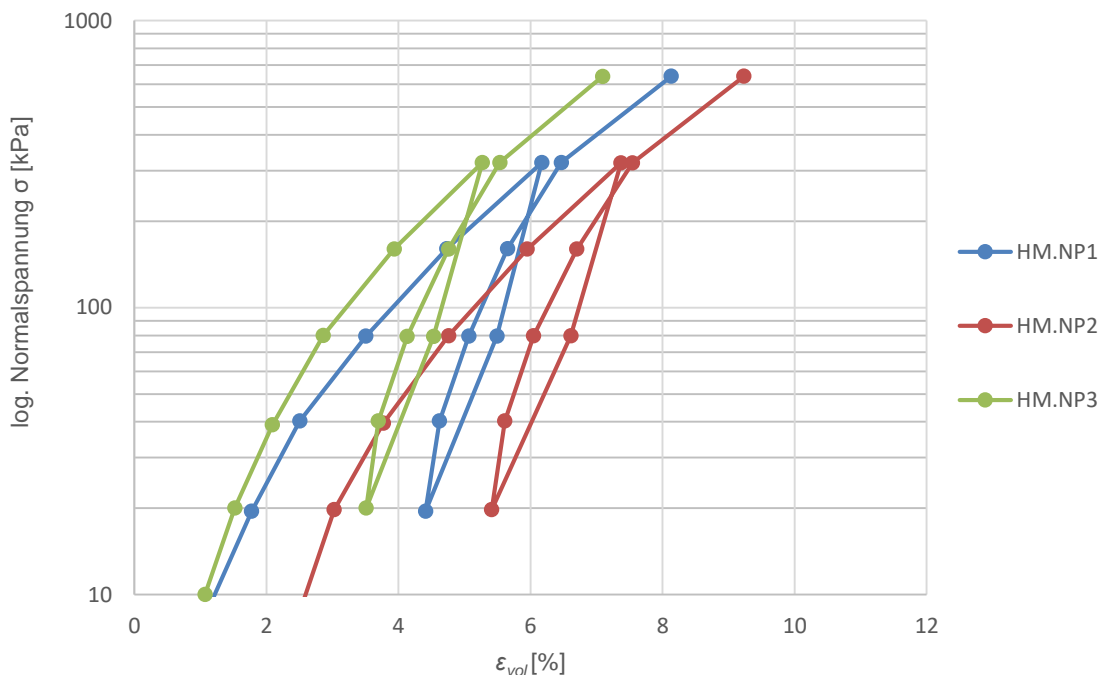


Abb. 47 $\varepsilon_{vol} - \sigma$ Diagramm Hintermuhr-Probe

3.2.3 Gesamtdarstellung der Probenqualitätskriterien Hintermuhr-Probe

Die Porenzahl e_i wurde für die Hintermuhr-Proben bei der Überlagerungsspannung σ'_{vo} bestimmt. Die schluffigen Bodenexemplare aus Hintermuhr werden über die Porenzahländerung $\Delta e/e_o$, mit der volumetrischen Dehnung über die effektive Überlagerungsspannung σ'_{vo} dargestellt. (Abb. 48 und 49).

Einerseits ist eine Verbesserung der Probenqualität bei der Probe HM.NP3 und andererseits eine Verschlechterung der Probe HM.NP2 zu erkennen (Abb.48). Alle drei Exemplare sind zufolge des Kriteriums $\Delta e/e_o$ in der Kategorie Sehr Schlecht eingeordnet. Dies kann auf die erhöhten Spannungen im Boden zurückgeführt werden, da die Entspannung der Proben weitaus höher als bei geringeren Tiefen sein kann.

In der Abbildung 49 fällt die Probe HM.NP.2 in die Kategorie E ein und die anderen zwei Bodenproben HM.NP.1 und HM.NP.3 fallen in die Einstufung D hinein. Die Untersuchung zeigt, dass die Qualität der Proben mit steigendem Schluffanteil zu einer Verschlechterung neigt (Abb. 50 und 51).

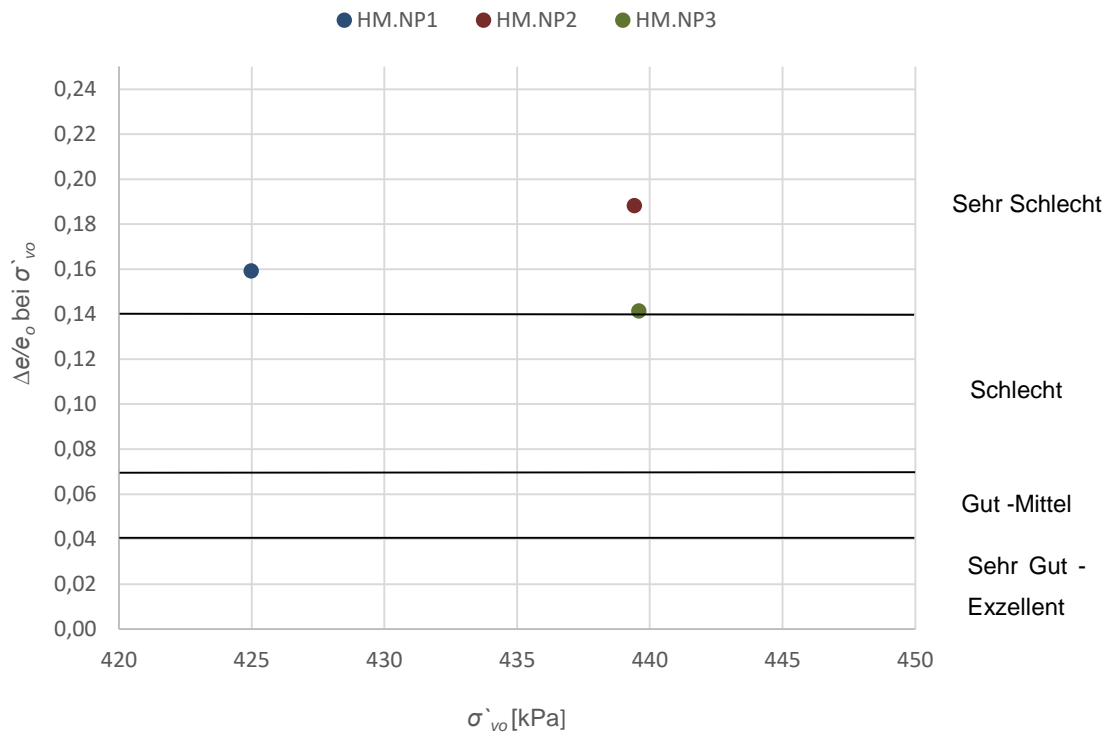


Abb. 48 $\Delta e/e_0$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei σ'_{v_0} Hintermuhr-Probe

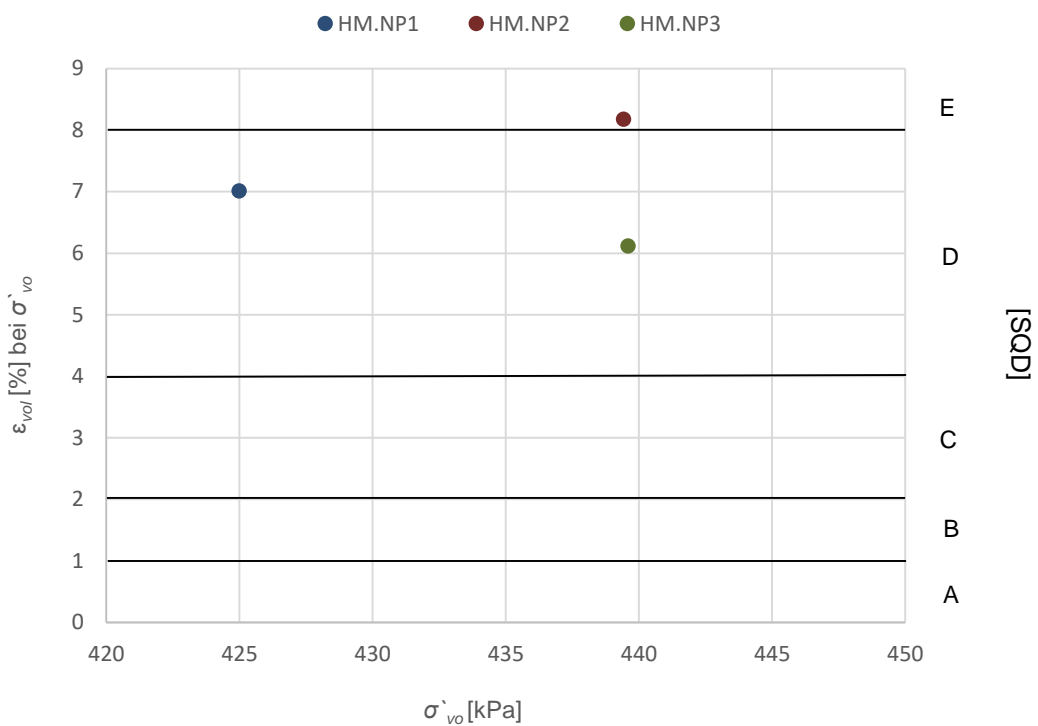


Abb. 49 ϵ_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei σ'_{vo} Hintermuhr-Probe

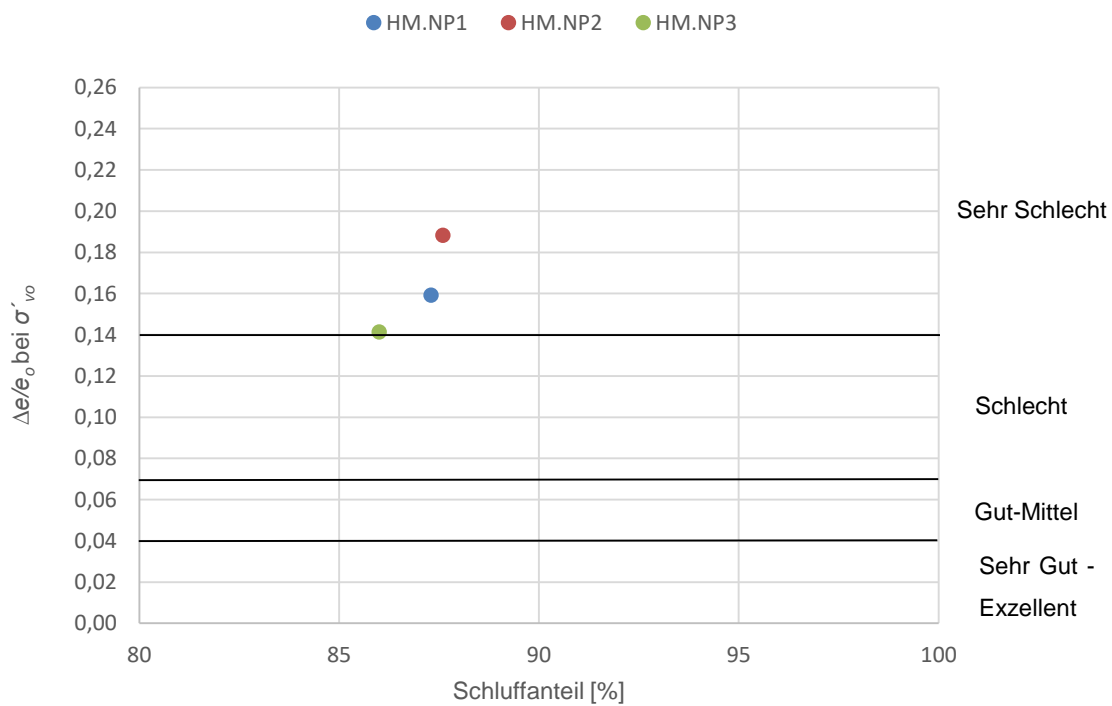


Abb. 50 $\Delta e/e_o$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei Schluffanteil [%]

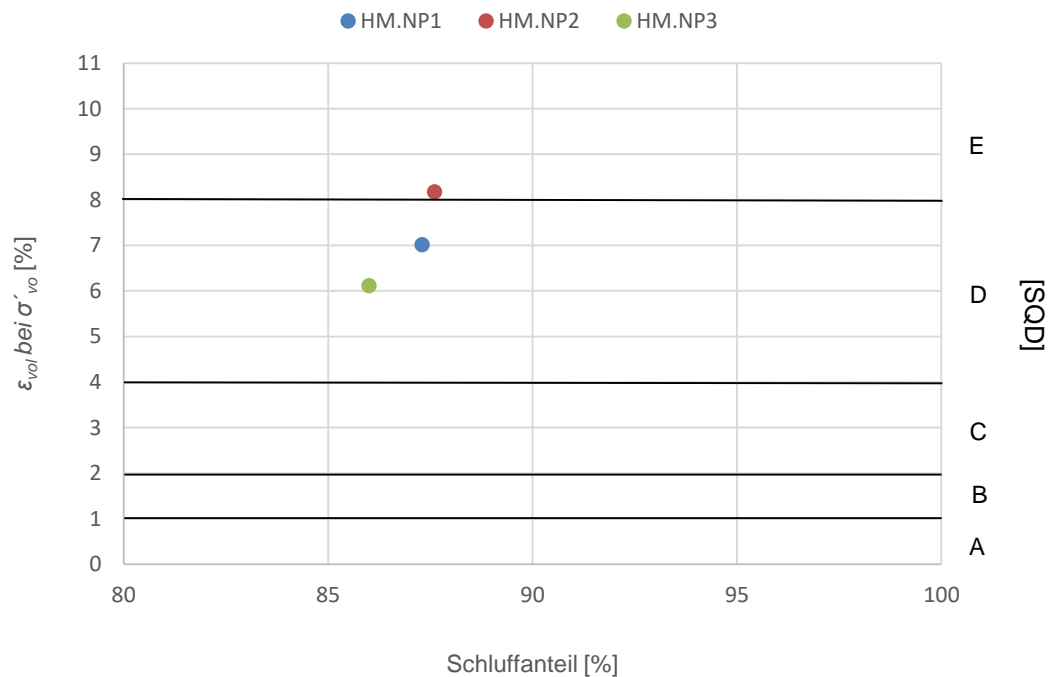


Abb. 51 ϵ_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei Schluffanteil [%]

3.2.4 Interpretation der Ergebnisse

Bei der Vorbereitung der Proben für die Laborversuche wurde sorgfältig gearbeitet um zusätzliche Störungen zu unterbinden. Die Proben aus Hintermuhr zeigen in den Abbildungen 48 und 49 keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den angewendeten Kriterien zur Beurteilung der Qualität von Proben und der effektiven Überlagerungsspannung σ'_{vo} . Eine Verschlechterung der Proben mit zunehmendem Schluffgehalt verdeutlichen die Abbildungen 50 und 51. Dennoch besteht keine eindeutige Beziehung zwischen den Kriterien und dem Anteil an Schluff, da zu wenig Werte vorhanden sind, um eine klare Aussage zu machen.

3.3 Ergebnisse aus der BVFS (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg)

Die BVFS stellte Ergebnisse von Kompressionsversuche von schluffigen Bodenproben zur Verfügung anhand welcher die Qualität der Proben beurteilt werden konnte. Dabei stammen die Probenexemplare aus verschiedenen Kernbohrungen sowie aus verschiedenen Tiefen aus dem Raum Salzburg-Stadt. Es wurde angenommen dass, der Grundwasserspiegel bei einer Tiefe von 8 Meter liegt, da nicht alle erforderlichen Daten vorhanden waren.

Mehr als die Hälfte der Proben wurden näherungsweise mit der Höhe der effektiven Überlagerungsspannung σ'_{vo} vorbelastet und erst dann den Belastungsstufen des Kompressionsversuches ausgesetzt. Mit der Anfangsporenzahl e_o und den spezifischen Setzungen wurden die weiteren Porenzahlen e_i bei jeder Druckstufe ermittelt. Die effektive Überlagerungsspannung σ'_{vo} wurde zunächst ermittelt und die dazugehörige Porenzahl e wurde in weiterer Folge interpoliert. Die Abbildung 52 verdeutlicht die Interpolation der Porenzahl e bei σ'_{vo} .

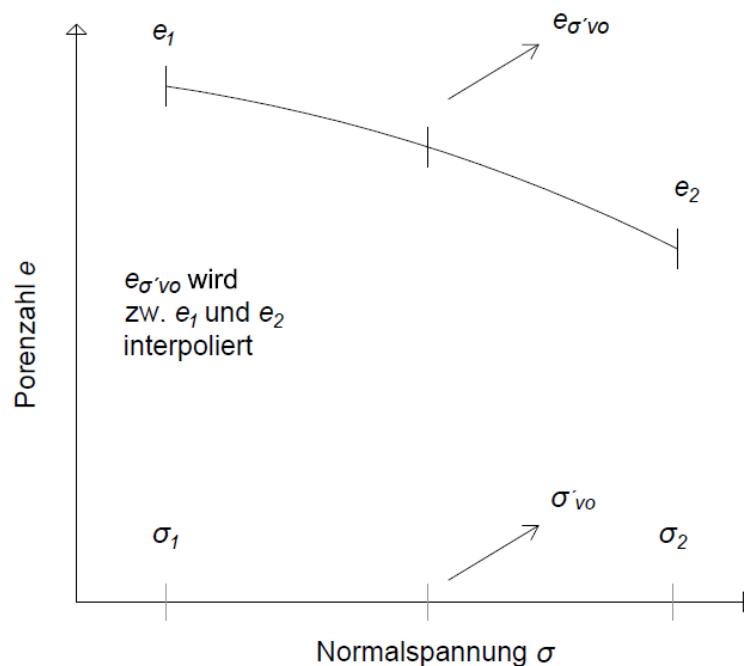


Abb. 52 Interpolation der Porenzahl $e_{\sigma'_{vo}}$ bei σ'_{vo}

3.3.1 Bodenparameter der Proben aus BVFS

In folgender Tabelle 22 sind die Bodenparameter der untersuchten Bodenproben angegeben. Bei nur einigen Proben liegt die Information über die Kornverteilung der BVFS vor. Die Kornfraktionen der Bodenproben sind in der Tabelle 23 angeführt.

Tab. 22 Bodenparameter aus den Ergebnissen von BVFS

Probe	ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	w [%]	n [%]	e_o	Sr
KB_17-18	2.02	2.78	26.9	42.8	0.75	1
KB_22.5-23	1.99	2.78	29	44.6	0.81	1
KB_28.5-29	2.02	2.81	27.3	43.4	0.77	1
KB1_9.8-9.9	2.05	2.67	22.5	37.5	0.60	1
KB1_25.1-25.15	2.07	2.8	24.6	40.7	0.69	1
KB1_25.15-25.25	1.92	2.8	35.5	48.2	0.93	0.98
KB2_6.5-6.8	2.05	2.73	19.5	37.3	0.60	1
KB2_9.4-9.6	2.07	2.74	27.8	38.3	0.62	1
KB2_12.2-12.25	2.07	2.8	24.6	40.7	0.69	1
KB2_12.7-12.9	1.96	2.72	32.1	44.1	0.79	1

Tab. 23 Bodenarten der Proben aus BVFS

Probe	Bodenart	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Kies [%]
KB_17-18	Schluff tonig	18.3	81.6	0.1	0
KB_22.5-23	Schluff tonig	22.9	76.8	0.2	0.1
KB_28.5-29	Schluff tonig	23.1	76.6	0.2	0.1
KB1_9.8-9.9	Schluff-Feinsand	2.1	49	41.2	7.7
KB1_25.1-25.15	Schluff, tonig, gering plastisch	k.A	k.A	k.A	k.A
KB1_25.15-25.25	Schluff, tonig, gering plastisch	k.A	k.A	k.A	k.A
KB2_6.5-6.8	Sand, schluff, sehr gering kiesig	k.A	k.A	k.A	k.A
KB2_9.4-9.6	Sand, schluffig, teils sehr gering tonig	k.A	k.A	k.A	k.A
KB2_12.2-12.25	Schluff-Feinsand	k.A	k.A	k.A	k.A
KB2_12.7-12.9	Schluff, sandig, gering tonig	k.A	k.A	k.A	k.A

Bezeichnung: z.B. KB_17-18 → Kernbohrung_Tiefe-Tiefe

3.3.2 Darstellung der Ergebnisse mit den Probenqualitätskriterien

Es ist anzumerken, dass die Probe KB_25.1-25.15 in den nachfolgenden Abbildungen (53 – 58) nicht dargestellt ist. Der Grund hierfür liegt in der zu großen volumetrischen Dehnung ε_{vol} mit 20.83 % und die zu große Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ mit 0.51. Damit ist die Probe für die beiden Kriterien nicht anwendbar.

In den nachfolgenden Abbildungen 53 - 58 sind die Ergebnisse einerseits mit der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und mit der volumetrischen Dehnung ε_{vol} über die Überlagerungsspannung σ'_{vo} und andererseits über den Schluffanteil abgebildet. Des Weiteren sind die Proben mit den Probenqualitätskriterien über die Tiefe dargestellt.

Es sind nur zwei der neun Proben in der Beurteilung Gut – Mittel eingestuft und die restlichen Bodenproben werden in der Kategorie mit Schlecht bis Sehr Schlecht beurteilt (Abb. 53) In der Abbildung 54 sind vier von zehn Proben in der Probenqualitätseinstufung C nach Terzaghi et al. (1996) eingeordnet. Alle anderen Probenexemplare befinden sich jenseits der Qualitätseinstufung von Gut-Mittel.

Bei der Untersuchung der Proben über den Schluffanteil mit der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ ist zu sehen, dass keiner der Exemplare eine bessere Einstufung hat als Schlecht (Abb. 55). Auch in der Darstellung der volumetrischen Dehnung ε_{vol} mit dem Schluffanteil ergibt sich für die Proben keine bessere Einstufung als C (Abb.56).

Da die Überlagerungsspannung σ'_{vo} mit der Tiefe zusammenhängt ergibt sich für die Proben die gleiche Beurteilung wie in den Abbildungen 53 und 54.

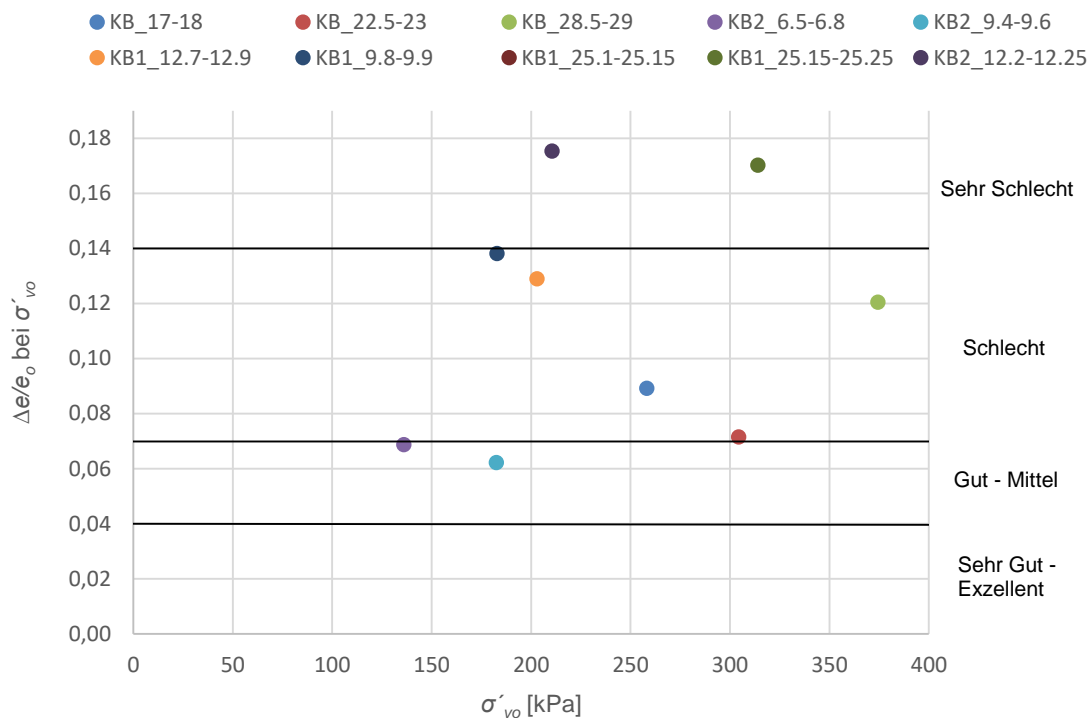


Abb. 53 $\Delta e/e_0$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) bei σ'_{v0}

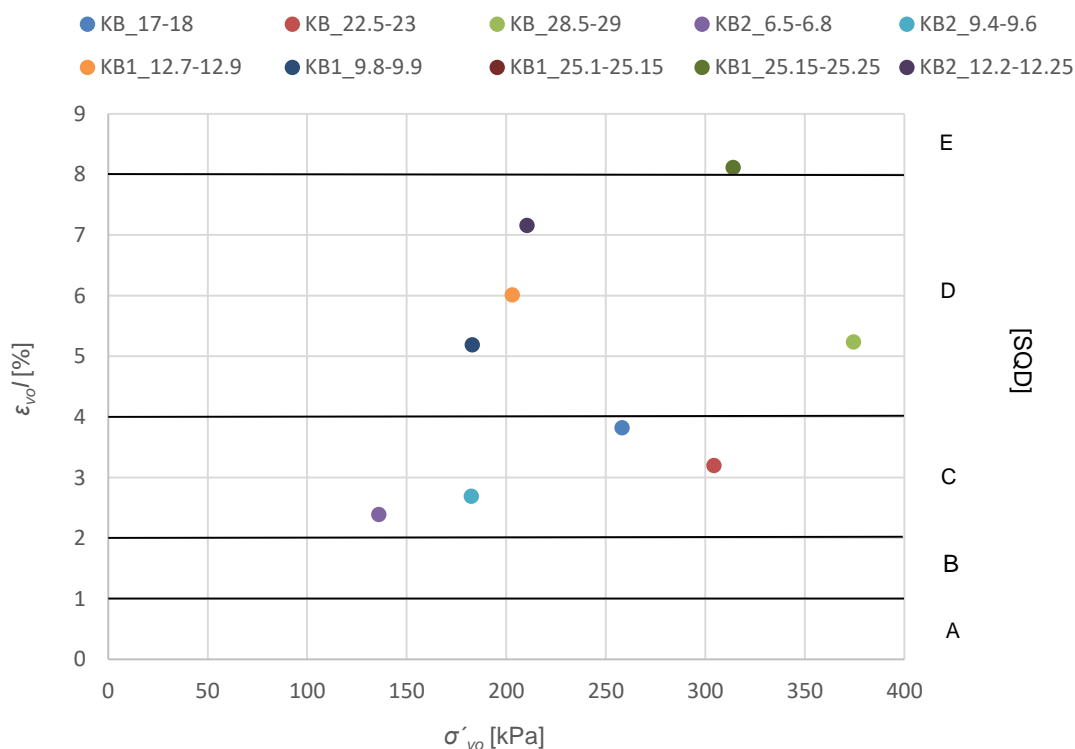


Abb. 54 ϵ_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) bei σ'_{v0}

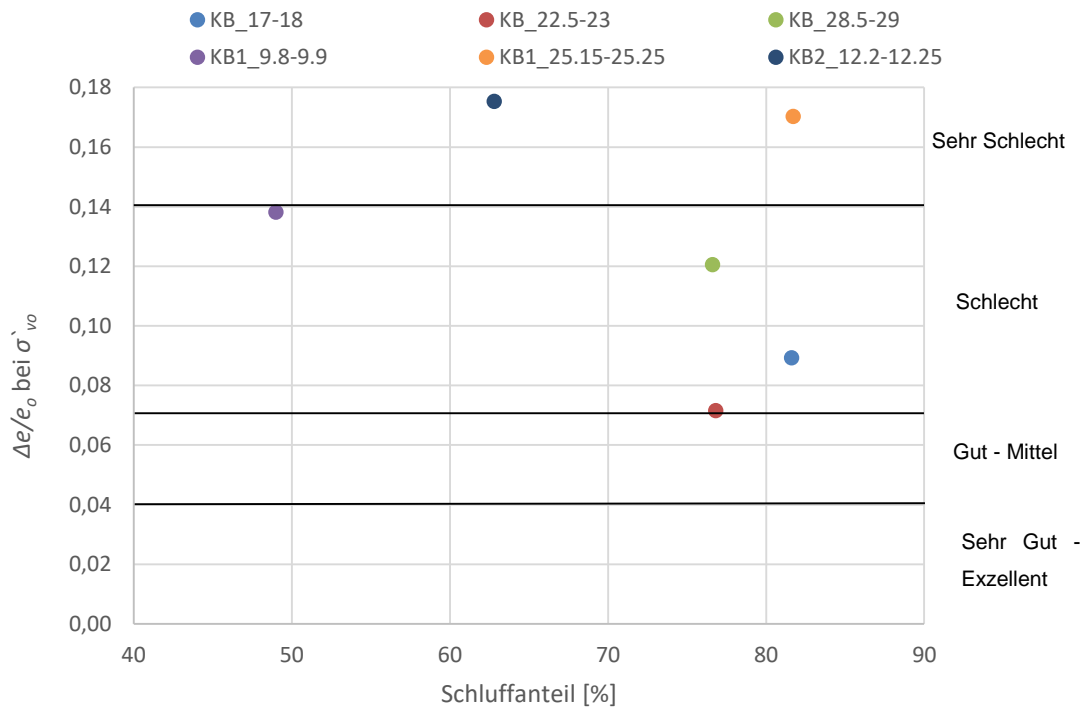


Abb. 55 $\Delta e/e_\sigma$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) mit Schluffanteil [%]

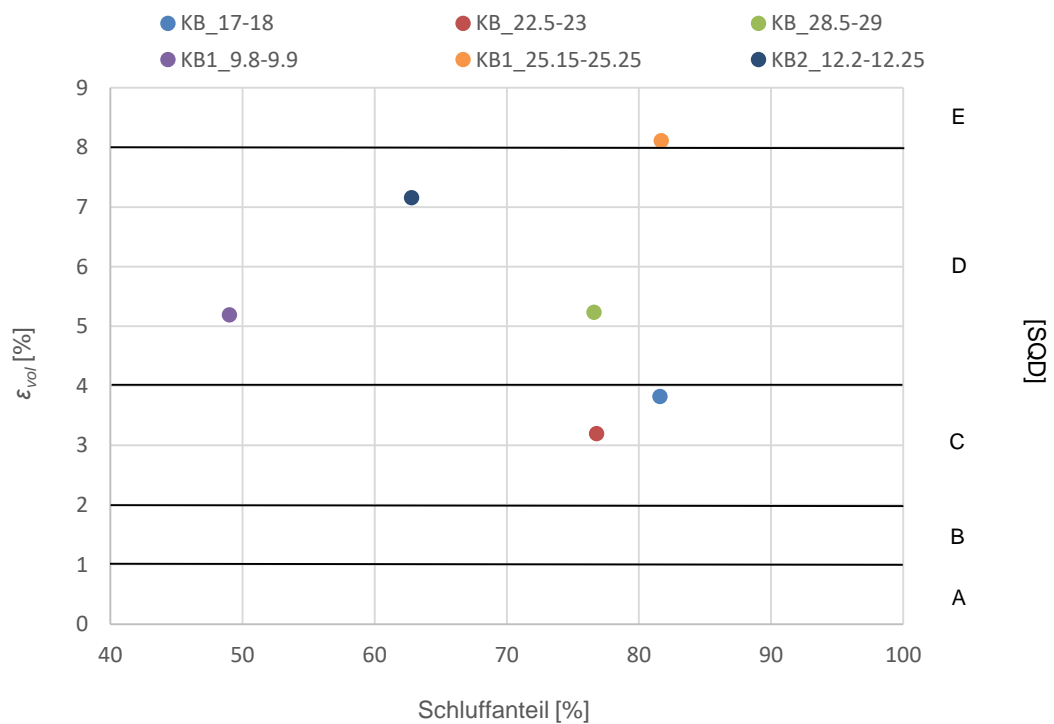


Abb. 56 ϵ_{vol} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) mit Schluffanteil [%]

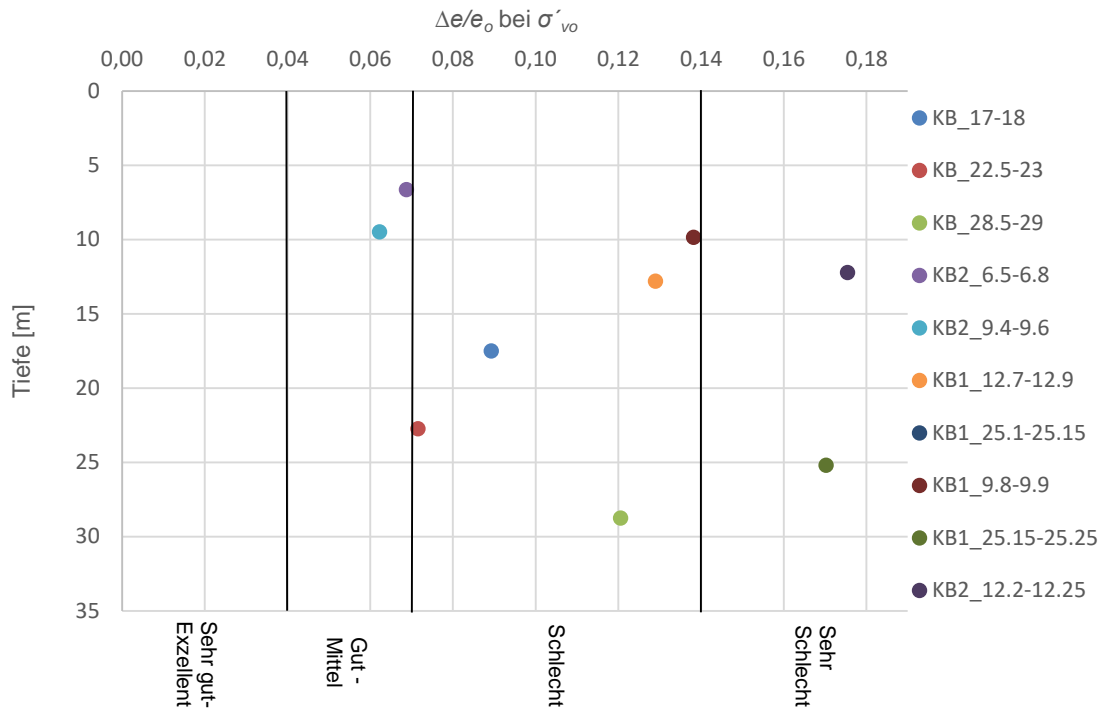


Abb. 57 $\Delta e/e_0$ -Kriterium nach Lunne et al. (1997) über die Tiefe

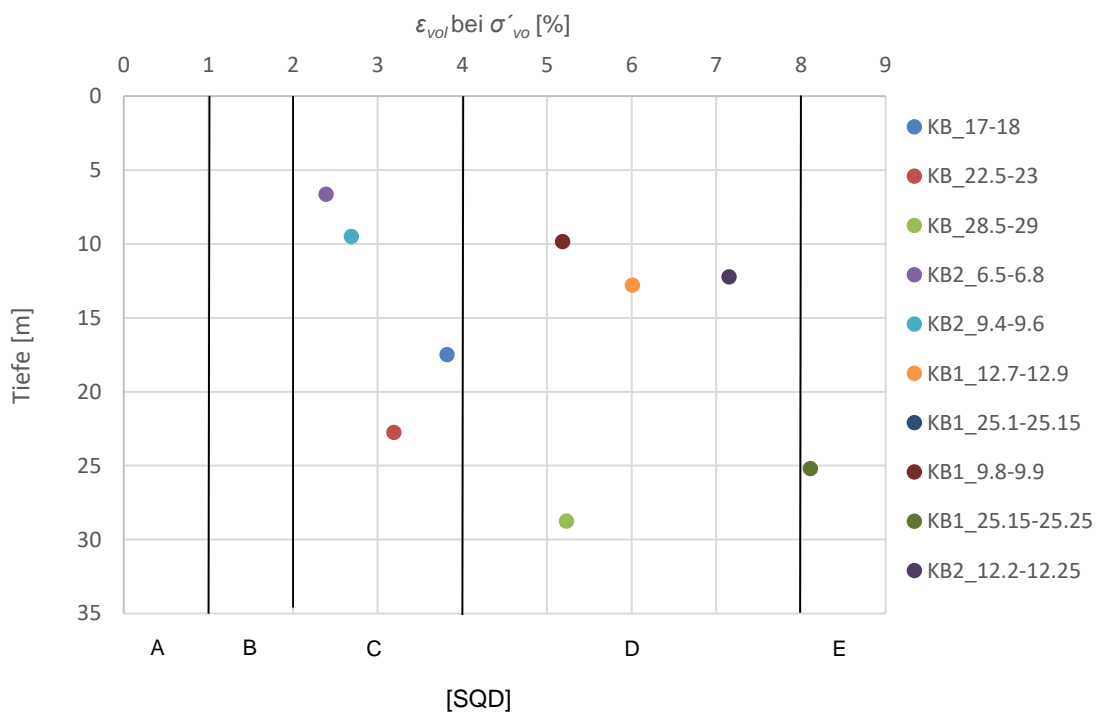


Abb. 58 ϵ_{vo} Kriterium nach Terzaghi et al. (1996) über die Tiefe

3.3.3 Interpretation der Ergebnisse

Mit den Daten der BVFS wurden Berechnungen gemacht um die Probenqualität untersuchen zu können, wobei eine Aussage über die weiteren Störungsfaktoren wie Entnahme, Transport, Lagerung und Vorbereitung für die Laborversuche nicht getroffen werden kann.

Einerseits ist eine Steigerung und andererseits eine Reduzierung der Probenqualität mit größer werdender effektiver Überlagerungsspannung σ'_{vo} bei den Proben KB_17-17, KB_22.5-23, KB_28.5-29, welche aus der gleichen Kernbohrung stammen, ersichtlich (Abb. 53 und 54). Dies verdeutlicht, dass es keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen den Parametern vorliegt.

Die Proben KB1_9.8-9.9, KB1_12.7-12.9 und KB1_25.15-25.25 zeigen sowohl mit zunehmender effektiver Überlagerungsspannung σ'_{vo} eine Verschlechterung als auch eine Verbesserung der Probenqualität (Abb.53). Die gleichen Proben weisen in der Abbildung 54 eine zunehmende Reduzierung der Qualität mit wachsender effektiver Überlagerungsspannung σ'_{vo} auf. Die Untersuchung zeigt hier auch, dass es keine eindeutige Beziehung der Werte gibt.

Für die Bodenproben KB2_6.5-6.8, KB2_9.4-9.6 und KB2_12.2-12.25 gilt die gleiche Aussage wie für die Proben aus der KB_1 (Abb.53 und 54).

Eine Korrelation der Probenqualität sowohl mit dem Schluffanteil als auch über die Tiefe ist ebenfalls nicht zu erkennen. (Abb. 55 und 56).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Eine umfassende Literaturrecherche bezüglich der Probenstörung während des gesamten Entnahmeprozesses bis hin zu den Laborversuchen wurde im Kapitel 1 ausführlich geschildert. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der Störung einer Probe auf die geotechnischen Parameter ebenfalls beschrieben. Mögliche Verbesserungen zur Einschränkung der Störungen an den Bodenproben wurden in Abschnitt 1.6 angeführt. Um eine gute Probenqualität erreichen zu können, sollten folgende Bedingungen nach Hvorslev (1949) weitestgehend erfüllt werden.

- Keine Störung der Bodenstruktur
- Keine Änderung des Wassergehaltes w und der Porenzahl e
- Keine Änderung der Bestandteile und der chemischen Zusammensetzung

Mit den Kriterien der Porenzahländerung $\Delta e/e_o$ und der volumetrischen Dehnung ε_{vol} wurden insgesamt 27 Proben aus vier verschiedenen Regionen auf die Probenqualität hin untersucht. Es wurden die Kriterien gegenüber der Überlagerungsspannung σ'_{vo} , dem Schluffanteil und über die Tiefe dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass keine Korrelation zwischen diesen Parametern zu erkennen ist.

Ob die beiden verwendeten Kriterien, Lunne et al. (1997) und Terzaghi et al. (1996), repräsentative Aussagen über die Qualität der Proben ermöglichen, kann hier nicht eindeutig beantwortet werden. Daher sollten einerseits mehrere Proben und andererseits verschiedene Kriterien wie die Saugspannung u_r , Scherwellengeschwindigkeit V_s und das Steifigkeitsverhältnis M_o/M_L zur weiteren Untersuchung der Probenqualität herangezogen werden.

5 Literatur

Amundsen, Helene Alexandra, Thakur, Vikas und Emdal, Arnfinn. (2015)

Comparison of two sample quality assessment methods applied to oedometer test results. Deformation Characteristics of Geomaterials. S. 923-930.

Andresen, A. und Kolstad, P. (1979)

The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials. Proceedings of the Int. Conf. on Soil Sampling. 1979, S. 13-21.

Atkinson, J.H., Allman M.A, Böese R.J. (1992)

Influence of laboratory sample preparation procedures on the strength and stiffness of intact Bothkennar soil recovered using the Laval sampler. Géotechnique 42 , No. 2, S. 349-354.

Baligh, M.M., Azzouz, A.S und Chin, C.T. (1987)

Disturbances due to "ideal" tube sampling. Journal of Geotechnical Engineering Vol. 113, No. 7. July , S. 739-757.

Baligh, Mohsen M. (1985).

Strain Path Method. Journal of Geotechnical Engineering Vol. 111, No. 9. September , S. 1108-1136.

Bulut, Rifat, Lytton, Robert L. und Wray, Warren K. (2001)

Soil suction measurements by filter paper. Geotechnical Special Publication Number 115. Proceedings of Geo-Institute Shallow Foundation and Soil Properties Comittee Sessions at the ASCE 2001 Civil Engineering Conference, S. 234-261.

Carruba, Paolo. (2000)

Stress relief disturbance and residual pore pressure in cohesive soils. Soils and Foundations Vol. 40, No. 1. Feb, S. 57-72.

Chandler, R.J und Gutierrez, C.I. (1986)

The filter-paper method of suction measurements. Géotechnique Vol. 36, S. 265-268.

Clayton, C.R.I, Matthews, M.C und Simon, N.E. (1982)

Sampling and sample disturbance. Site Investigation. Second Edition., Chapter 6.

DeGroot, Don J. und Landon, Melissa M. (2007)

Laboratory testing of undisturbed soft clay samples to determine engineering design parameters. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXIX. No 1-2.

Hight, D.W, et al. (1992)

Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing. Géotechnique 42, No. 2., S. 199-217.

Hornig, Vuthy, Tanaka, Hiroyuki und Obara, Takashi. (2010)

Effects of sampling tube geometry on soft clayey sample quality evaluated by nondestructive methods. Soils and Foundations Vol. 50, No. 1. Feb, S. 93-107.

Hvorslev, M.Juul. (1949)

Subsurface exploration and sampling of soils civil engineering purposes. Committee of sampling and testing of the soil mechanics and foundation engineering Division ASCE. November, S. 182-206.

Karlsrud, Kjell und Hernandez Martinez, Francisci Gabriel. (2013)

Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples. Canadian Geotechnical Journal Vol. 50. December, S. 1273-1293.

La Rochelle, P., Sarrailh, J., Tavenas, F., Roy, M., and Leroueil, S.. (1981)

Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils. Canadian Geotechnical Journal, 18., S. 52-66.

La Rochelle, P., Leroueil, S. und Tavenas, F. (1986).

A technique for long-term storage of clay samples. Canadian Geotechnical Journal Vol. 23, S. 602-605.

Ladd, C.C. und DeGroot, D.J. (2003)

Recommended practice for soft ground site characterization. Arthur Casagrande Lecture, Proc. 12th Panamerican Conf. on Soil Mechanics end Geotech. Eng. MIT Vol. 1, S. 3-57.

Ladd, C.C. und Lambe. (1963)

The shear strength of undisturbed clay determined from undrained tests. ASTM. STP. 361, S. 342-370.

Landon, Melissa M., DeGroot, Don J. und Sheahan, Thomas C. (2007)

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE. Nondestructive sample quality assessment of a soft clay using shear wave velocity. April, S. 424-432.

Long, Michael und Donohue, Shane. (2009)

Suction measurements as indicators of sample quality in soft clay. Geotechnical Testing Journal, Vol. 32 No. 3., S. 286-295.

Long, Michael, et al. (2010)

Engineering characterisation of Norwegian glaciomarine silt. Engineering Geology 110., S. 51-65.

Lunne, T., Berre, T. und Strandvik, S. (1997)

Sample disturbance effect in soft low plasticity Norwegian clay. Proceedings of the Conference on Recent Developments in Soil Mechanics.

Lunne, Tom und Long, Michael. (2006)

Review of long seabed samplers and criteria for new sampler design. International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics 226, S. 145-165.

Melzer, Klaus-Jürgen, Bergdahl, Ulf und Fecker, Edwin. (2008)

Baugrunduntersuchungen im Feld. [Buchverf.] Karl Josef Witt. Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen . Berlin : Ernst & Sohn.

ÖNORM EN ISO 22475-1. (2006)

Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen.

Santagata, M.C. und Germaine, J.T. (2002)

Sampling disturbance effects in normally consolidated clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Dezember, S. 997-1006.

Scheriau, Johannes. (2015)

Vergleich von natürlichen und wiederhergestellten Schluff-Böden. Graz : Technische Universität Graz.

Shogaki, Takaharu. (1996)

A method for correcting consolidation parameters for sample disturbance using volumetric strain. Soils and Foundations Vol. 36, No. 3. Sept, S. 123-131.

Shogaki, Takaharu und Kaneko, Misao. (1994)

Effects of sample disturbance on strength and consolidation parameters of soft clay. Soils and Foundations Vol. 34, No.3. September, S. 1-10.

Skempton, A.W. und Sowa, V.A. (1963)

The behaviour of saturated clays during sampling and testing. Geotechnique Vol. 13 Issue 4. Dezember, S. 269-290.

Tanaka, Hiroyuki. (2000)

Sample quality of cohesive soils: Lessons from three sites, Ariake, Bothkennar, and Drammen. Soils and Foundation Vol. 40, No. 4. Aug. S. 57-74.

Tanaka, Hiroyuki und Tanaka , Masanori. (2006)

Main factors governing residual effective stress for cohesive soils sampled by tube sampling. Soils and Foundations Vol.26, No. 2. April S. 209-219.

Terzaghi , K., Peck, R.B und Mesri, G. (1996)

Soil Mechanics in Engineering Practice . 3rd Edition, New York : John Wiley and Sons.