

**„Vergleichende Untersuchungen zum zyklischen Verhalten
zweier Böden im dreiaxialen Spannungsfeld“**

Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

im Studiengang Bauingenieurwesen

der Fakultät Bauwesen

an der

HTWK Leipzig

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur

Johannes Bufe

61049

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Friedemann Sandig

Praxispartner: Dipl.-Ing. Matthias Pamler

Leipzig, 2016

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
Einführung	10
Kurzfassung	10
Abstract	10
1 Ziele der Arbeit.....	11
2 Methodik	12
3 Stand des Wissens.....	14
3.1 Normierung triaxialer Laborversuche	14
3.2 Funktion und Grenzen triaxialer Prüfmaschinen	14
3.3 Problembeschreibung für teilgesättigte Prüfungen	15
4 Herstellung und Einbau von Probematerial.....	17
4.1 Allgemeines	17
4.2 Vorbereitung und Einbau von Auelehm (TL).....	18
4.3 Einbau von Karlsruher Sand (SE).....	21
4.4 Komplikationen und Empfehlungen in Herstellung und Probeneinbau	21
5 Der K0-Versuch	23
5.1 K0-Versuch und einaxialer Kompressionsversuch.....	23
5.2 K0-Versuch mit Wasserverdrängung	24
5.3 K0-Versuch mit Querdehnung	25
6 Dynamische Triaxialversuche.....	26
6.1 Vorbetrachtungen	26
6.2 Sättigung und Konsolidation	26
6.3 Versuche zur Anregungsfrequenz	27
6.4 Zyklische CU-Triaxialversuche.....	28
6.5 Simulation Walzenüberfahrt	29
7 Bewertung der Versuche	31
7.1 Diskussion der Versuchsergebnisse.....	31
7.1.1 K0- und Oedometerversuch	31
7.1.2 Anregungsfrequenz	33
7.1.3 Variation von Last- und Umlagerungsspannung.....	36
7.1.4 Walzenüberfahrt.....	38
7.2 Grafische Auswertung der Exportdateien	41

7.3 Fehleranalyse	45
8 Anwendungsgebiete.....	47
9 Genauere Messverfahren	48
9.1 Lokale Messungen	48
9.2 Messungen anderer Einflussgrößen	49
9.3 Auswahl des Prüfverfahrens für dynamische Belastungen	49
10 Zusammenfassung und Ausblick	51
Anhang A: Protokolle.....	52
A.1 Wassergehalt Probekörper	52
A.2 Proctordichte/-kurve.....	53
A.3 Bodenmechanisches Datenblatt Karlsruher Sand (SE)	54
Anhang B: Protokolle K0-Versuch	56
B.1 Vorbereitung Versuchsstand	56
B.2 Durchführung.....	57
B.3 Grafische Auswertung	58
Anhang C: Protokolle Anregungsfrequenz.....	59
C.1 Versuchsschema.....	59
C.2 Vorbereitung Versuchsstand.....	60
C.3 Durchführung.....	61
C.4 Grafische Auswertung	62
Anhang D: Protokolle Zyklischer CU-Versuch.....	63
D.1 Versuchsschema	63
Anhang E: Protokolle Simulation Walzenüberfahrt.....	64
E.1 Versuchsschema	64
E.2 Durchführung.....	66
Anhang F: Datenblätter	67
F.1 Rüttelplatten	67
F.2 Walze.....	68
Anhang G: Übersicht Triaxialversuche	69
Anhang H: Technische Systemübersicht.....	70
Anhang I: Protokoll B-Test.....	71
Anhang J: Vergleich der Datenexporte.....	72
Glossar	76
Literaturverzeichnis	81
Erklärung.....	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dreiphasenmodell des Bodens.

Abbildung 2: Schema zum Einfluss dynamischer und zyklischer Belastung auf Böden.

Abbildung 3: Feuchtdichten der TL-Probekörper bei $d=100$ mm und $d=50$ mm im Vergleich.

Abbildung 4: Zonenbruch, Ausstechequipment und drei vollständige Druckzellen von TL.

Abbildung 5: Schematische Anordnung zum Versuchsaufbau eines K0-Versuchs.

Abbildung 6: Kunststoffkörper in der Druckzelle, TL: Einbau in 50er Druckzelle, 50er Druckzelle in der Prüfpresse.

Abbildung 7: Phase 2 Simulation Walzenüberfahrt: Schema für 50%ige statische und dynamische Walzenlast.

Abbildung 8: Setzungsverläufe von einaxialen Kompressionsversuch und K0-Versuch mit Querdehnung.

Abbildung 9: Last-Setzungsverläufe von einaxialen Kompressionsversuch und K0-Versuch mit Querdehnung.

Abbildung 10: Setzungen von Auelehm (TL) bei verschiedenen Frequenzen.

Abbildung 11: Setzungen von Karlsruher Sand (SE) bei verschiedenen Frequenzen.

Abbildung 12: Statische und zyklisch/dynamische Setzung s [mm] von TL und SE.

Abbildung 14: Setzungskurven für SE mit 10-Minuten-Fenster.

Abbildung 15: Setzungskurven für TL mit 10-Minuten-Fenster.

Abbildung 16: Setzungsverhalten von TL bei drei Starts der Walze mit vergrößerter Darstellung der dynamischen Belastungs- und statischen Ruhephase.

Abbildung 17: 40%iger Lasteintrag auf TL bei drei Starts der Walze mit vergrößerter Darstellung der dynamischen Belastungs- und statischen Ruhephase.

Abbildung 18: Abgescherte TL-Probe aus Phase 2 Simulation Walzenüberfahrt.

Abbildung 19: Phase 2 Simulation Walzenüberfahrt: Grafische Darstellung von Belastung und Setzungsverhalten.

Abbildung 20: Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von SE bei 15 Hz mit 1-, 10- und 50-Sekunden-Fenster.

Abbildung 21: Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von TL bei 1 Hz mit 1-, 10- und 100-Sekunden-Fenster.

Abbildung 22: Ungenaue Darstellung des Last-Setzungsverhalten von Auelehm unter 1 Hz.

Abbildung 23: Genaue Darstellung des Last-Setzungsverhaltens von Auelehm unter 1 Hz mit Hystereseschleifen.

Abbildung 24: Verläufe von Hystereseschleifen.

Abbildung 25: Lastamplitude bei Karlsruher Sand unter 1 Hz.

Abbildung 26: Hauptaufgabengebiete der Bodendynamik nach STUDER (2007).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Feuchtdichten der Probekörper (TL, $d_0=100\text{mm}$).

Tabelle 2: Feuchtdichten der Probekörper und Verwendung (TL, $d_0=50\text{mm}$).

Tabelle 3: Einbaudichten von Karlsruher Sand bei lockerem und dichtem Einbau in die triaxiale Druckzelle.

Tabelle 4: Vergleich der möglichen Wasserverdrängung verschiedener Druckzellen und Probekörpergrößen.

Tabelle 5: Zelldrucknachsteuerung mit $\nu=0,35$. $\sigma_3=\sigma_1*\nu/(1-\nu)$.

Tabelle 6: Phase 1 Anregungsfrequenz: Eingangsparameter im Versuchsschema.

Tabelle 7: Phase 2 Variation der Last- und Umlagerungsspannungen: Eingangsparameter im Versuchsschema.

Tabelle 8: Phase 2 Variation der Last- und Umlagerungsspannungen: manuelle Nachsteuerung.

Tabelle 9: Simulation der Walzenüberfahrt: Ergebnisse aus manueller Nachsteuerung.

Tabelle 10: Phase 1 Simulation Walzenüberfahrt: Eingabeparameter bei 40% dynamischer und statischer Walzelast.

Tabelle 11: Laststufen und Steifemodule aus K0- und Oedometerversuch.

Tabelle 12: K0-Versuch: tatsächlicher axialer Lasteintrag infolge Zelldruck und Axialdruck.

Tabelle 13: Phase 1 Anregungsfrequenz: Setzungen und Frequenzen.

Tabelle 14: Manuelle Nachsteuerung verschiedener Frequenzen.

Tabelle 15: Darstellung des prozentualen Anteils der dynamischen Verdichtung von TL und SE in verschiedenen Tiefen.

Tabelle 16: Phase 1 Simulation Walzenüberfahrt: statische und dynamische Verdichtung des Walzenstarts.

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Benennung
CAD-Versuch	anisotrop konsolidierter, dräniertes, triaxialer Scherversuch
CAU-Versuch	anisotrop konsolidierter, undräniertes, triaxialer Scherversuch
CCV-Versuch	konsolidierter, dräniertes, triaxialer Scherversuch mit konstant gehaltenem Volumen
CID-Versuch	isotrop konsolidierter, dräniertes, triaxialer Scherversuch
CIU-Versuch	isotrop konsolidierter, undräniertes, triaxialer Scherversuch
CU-Versuch	konsolidierter, undräniertes, triaxialer Scherversuch
D-Versuch	konsolidierter, drainiertes, triaxialer Scherversuch
K0-Versuch	konsolidierter, drainiertes, triaxialer Kompressionsversuch mit verhinderter Radialausdehnung und ohne Wandreibung
SE	Karlsruher Sand
TL	Auelehm
UU-Versuch	unkonsolidierter, undräniertes, triaxialer Scherversuch
α' [°]	Neigungswinkel der geraden Umhüllenden
δ_L [m]	weitere Setzungen infolge der Verdichtung des Bodens (GOST)
ε [%]	Dehnung, $\varepsilon = \Delta l / l_0$
ε_{1f} [%]	geschätzte axiale Bruchstauchung, erwartete Vertikaldehnung (Absolutwert) beim Bruch
$\dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ [s ⁻¹]	Stauchungsgeschwindigkeit bzw. Dehnungsgeschwindigkeit (Dehnungsrate)
$(\varepsilon_1)_{50}$ [%]	der Wert ε_1 bei $(\sigma_1)_{50} = (\sigma_{1f} + \sigma_{1c})/2$, korrigiert für mögliche Fehlmessungen
λ_{cs} [1]	Kohäsionskonstante für Scherfugen
λ_c [1]	Kohäsionskonstante für Zonenbruch
ρ [g/cm ³]	Dichte
σ [kN/m ²]	totale Normalspannung (Druck positiv)
σ_{cell} [kN/m ²]	totaler Zellendruck
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ [kN/m ²]	totale Hauptspannungen, wobei σ_1 oder σ_v axialer Druck und $\sigma_{2/3}$ oder σ_3 oder σ_h auch als Zellendruck bezeichnet werden
σ_{c0} [kN/m ²]	Anfangszellendruck
$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ [kN/m ²]	effektive Hauptspannungen
σ_c, σ'_c [kN/m ²]	Konsolidationsspannung
σ_{1c}' [kN/m ²]	vertikale Konsolidationsspannung

σ_{3c} [kN/m ²]	horizontale Konsolidationsspannung
σ' [kN/m ²]	effektive Normalspannung, $\sigma' = \sigma - u$
$\max \sigma'$ [kN/m ²]	größte Konsolidationsspannung, die der Boden je erfahren hat
$\sigma_d, \sigma_{d,neu}$ [kN/m ²]	dynamische axiale Spannung, manuelle Nachsteuerung
σ'_v [kN/m ²]	Vergleichsspannung der Konsolidation
$\text{Max } \sigma'_v$ [kN/m ²]	Vergleichsspannung für $\max \sigma'$
σ'_{vm} [kN/m ²]	größte Vergleichsspannung der Konsolidation im Versuch
$(\Delta \sigma_1)_m$ [kN/m ²]	Korrektur totale Vertikalspannung für Gummihülle
$(\Delta \sigma_1)_{fp}$ [kN/m ²]	Korrektur totale Vertikalspannung für Filterstreifen
$(\Delta \sigma_3)_m$ [kN/m ²]	Korrektur totale Horizontalspannung für Gummihülle
σ_{1f} [kN/m ²]	größere totale Spannung beim Bruch
σ_{1c} [kN/m ²]	größere totale Spannung am Ende der Konsolidation
τ [kN/m ²]	totale und effektive Schubspannung
τ_f [kN/m ²]	Scherfestigkeit, Schubspannung in der Scherfuge
τ_R [kN/m ²]	Restscherfestigkeit
ν [-]	Poisson-Zahl
φ [°]	Reibungswinkel
φ' [°]	effektiver Reibungswinkel
φ'_o [°]	effektiver Reibungswinkel für gleichen Wassergehalt
$\varphi'_k, \varphi_{cr}, \varphi_c$ [°]	kritischer Reibungswinkel
φ_{max} [°]	maximaler Reibungswinkel
φ_u [°]	totaler Reibungswinkel des undrained Bodens
φ_r [°]	Restreibungswinkel, $\varphi_r = \tan^{-1}(\tau/\sigma)_r$, siehe KOLYMBAS (2012, S. 135)
φ'_s [°]	Winkel der Gesamtscherfestigkeit
φ'_w [°]	Sekantenreibungswinkel
ω [Hz]	Resonanzfrequenz der Schwingung
θ [°]	Tangente des Torsionsneigungswinkels
a [cm ²]	Querschnittsfläche Stempel
a_{max} [m/s ²]	maximale Beschleunigung von Schwingungen die durch Erdbeben an die Erdoberfläche gelangen
A_0 [cm ²]	Anfangsquerschnittsfläche Probekörper
A [cm ²]	$(V_i - \Delta V_c - \Delta V) / (H_i - \Delta H_c - \Delta H)$, mittlere Querschnittsfläche Probekörper
A [cm ²]	Amplitude, Schwingungsamplitude
A_{100}, A_{30} [m ²]	Fläche des Probekörpers bei 100 (20) mm Durchmesser
b' [kN/m ²]	Ordinatenabschnitt der geraden Umhüllenden
c [kN/m ²]	Kohäsion

c_c [kN/m ²]	Kapillarkohäsion
c_u [kN/m ²]	(totale) Kohäsion des undrained Bodens, undrainierte Kohäsion
c' [kN/m ²]	effektive Kohäsion
c'_w [kN/m ²]	effektive Kohäsion für gleichen Wassergehalt
C [m/s]	seismische Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
d, d_0 [cm]	Durchmesser, Anfangsdurchmesser Probekörper
D_H [m]	horizontale Ausbreitung im Boden (GOST)
E [kN/m ²]	Elastizitätsmodul
E_s [kN/m ²]	Steifemodul, $E_s = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$
E_d [kN/m ²]	dynamisches Modul (meist linear)
e, e_0, e_{min} [1]	Porenzahl, Porenziffer, Anfangsporenzahl, Mindestporenzahl
f [1]	Faktor
f [Hz]	Frequenz
F [kN]	Kraft
F_1 [kN]	statische Auflast (axial)
$F_d, F_{d,neu}$ [kN]	dynamische Auflast (axial), manuelle Nachsteuerung
F_L [%]	Grad der möglichen Bodenverflüssigung (Liquefaktion)
G [kN/m ²]	Schubmodul, Schermodul, G-Modul, dynamisches Schermodul
h, h_0, H_i [cm]	Höhe, Anfangshöhe Probekörper
H [m]	Mächtigkeit Bodenschicht
H_w [m]	Geschätzter Grundwasserspiegel
$\Delta H, \Delta h$ [cm]	Vertikalverformung nach Abscheren, Setzung
ΔH_c [cm]	Vertikalverformung während Konsolidation, messen oder $(1/3) * (\Delta V_c / V_i) * H_i$
I_p (%)	Plastizitätszahl
k [-]	Index für kritisch(-er Grenzzustand)
K	$W - [(A-a) * h * \gamma]$ mit h - Abstand Oberkante Druckkappe zur Mitte Probekörper; W - Gewichtskraft aus Belastungsaufhängung; γ - Wichte Zellenflüssigkeit
K_0 [1]	Ruhedruckbeiwert, Seitendruckkoeffizient, $\sigma_3' = K_0 * \sigma_1'$
K_c [1]	Konsolidationsverhältnis der effektiven Spannungen, $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c}$
N_L [1]	dynamische Zyklenzahl zum Auftreten von Bodenverflüssigung (GOST)
p [kN/m ²]	totaler isotroper Druck
p' [kN/m ²]	effektiver isotroper Druck
P_0 [kN]	Stempelkraft infolge Zellenendruck σ_3
P [kN]	Vertikalbelastung, Stempelkopf, erforderliche Stempelkraft, $P = (\sigma'_{1c} -$

	$\sigma'_{3c} * A - K + (\sigma'_{3c} + u_B) * a$
PGA [m/s ²]	horizontale seismische Beschleunigung (GOST)
PPR-Wert [-]	u/σ_3 (GOST)
\bar{q}, σ_{dp} [kN/m ²]	Deviatorspannung, zyklische Deviatorspannung
q [kN/m ²]	Hauptspannungsdifferenz
	$q = \sigma_1 - \sigma_3$
R [-]	Index für Restscherfestigkeit
s, s _{max} [mm]	Setzung, maximale Setzung
s _{el} [mm]	elastische Setzung während eines dynamischen Triaxialversuches
s _{pl} [mm]	plastische Setzung infolge eines dynamischen Lasteintrages
s _{stat} , s _{dyn} [mm]	Setzung infolge statischer (dynamischer) Belastung
Σs [mm]	Summe der Setzungen
S _r [-]	Sättigungszahl, Sättigungsgrad
t [hh:mm:ss]	Zeit
t ₁₀₀ [s]	Bezugszeit
t ₅₀ [s]	Erforderliche Zeit für 50% Primärkonsolidation
u [kN/m ²]	Porenwasserdruck, Back Pressure
u ₀ [kN/m ²]	Sättigungsdruck, hydrostatischer Porenwasserdruck, $u_0 = 5000 \text{ kN/m}^2 * (1 - S_r) / S_r$
u _B [kN/m ²]	Gegendruck (=Porenwasserdruck bei Beginn des Abscherens)
u _c [kN/m ²]	Porenwasserüberdruck nach Konsolidation/Belastung
Δu [kN/m ²]	Änderung des Porenwasserdrucks durch äußere Spannungen (Zelldruck)
max v ₁ , v _{max}	$[(H_i - \Delta H_c) * \epsilon_{1f}] / [F * t_{50}]$, größte zugelassene axiale
[mm/s]	Vorschubgeschwindigkeit, für C-Versuche: $\max v_1 = \max (\Delta h / \Delta t) = (h * \epsilon_{1f}) / (15 * t_{100})$
V ₀ , V _i [cm ³]	Anfangsvolumen Probekörper
V _c [ml]	Füllvolumen Druckzelle
ΔV [cm ³ , ml]	Volumenänderung Probekörper (während Abscheren), verdrängtes Volumen
ΔV _c [cm ³]	Volumenänderung während Konsolidation
w [1]	Wassergehalt
W [kJ/m ³]	Elastische Dehnungsenergie
x [mm]	Scherweg

Einführung

Kurzfassung

Triaxiale Laborversuche bieten die Möglichkeit verschiedenste Vorgänge in Natur und Technik zu simulieren, sowie Eigenschaften spezifischer Böden zu untersuchen. Verbesserte Datenerfassung und Versuchssteuerung, infolge des ständigen Fortschritts der Computerentwicklung, gewährleisten individuelle Anpassung von Parametern und genauere Beurteilungen bezüglich des Verhaltens verschiedener Böden. Diese Arbeit deckt beide Sachverhalte ab, indem zum einen zwei Böden hinsichtlich ihres Verdichtungsverhaltens betrachtet und andererseits Simulationen von Walzenüberfahrten, sowie Rüttelplatten durchgeführt wurden.

Die Erarbeitung der Thematik erfolgte im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes TCDyn der G² Gruppe Geotechnik, dessen Gegenstand die Entwicklung einer Hochfrequenz-Triaxialzelle zur Untersuchung dynamisch angeregter teilgesättigter Böden im Frequenzbereich bis 70 Hz ist.

Einerseits sollen die vorliegenden Ausführungen als Einstieg in die Durchführung und Evaluation dynamischer Triaxialversuche und andererseits auch als spezifisches Nachschlagewerk für Formelzeichen, Definitionen und Sachverhalte dienen.

Abstract

Triaxial shear tests offer the possibility to simulate a wide range of phenomenon in nature and technology as well as researching properties of specific soils. Advanced data collection and software control due to constant improvements in computer technology provide for individual definition of parameters and precise analysis of several soils. This thesis focuses on both topics by firstly observing the compaction behavior of two soils and secondly simulating a steam roller as well as the effects of a compactor in several depths.

The topic is subordinate to the research and development project TCDyn of G² Gruppe Geotechnik that focuses on the development of a high-frequency triaxial cell to investigate the dynamic effects on partially saturated soils up to 70 Hz.

On the one hand this paper is aimed to give an introduction into the implementation of dynamic triaxial shear tests and on the other it is supposed to serve as a source of references regarding symbols, definitions and specific issues.

1 Ziele der Arbeit

Grundlage der Arbeit ist, erste Erfahrungen mit der Triaxialanlage der HTWK Leipzig, die während des sechswöchigen Ingenieurpraktikums gesammelt wurden, vom statischen auf den dynamischen Bereich zu erweitern. In der Nebenbetrachtung standen Untersuchungen zur Genauigkeit von Messergebnissen, sowie Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten der Prüfanlage, insbesondere im Hinblick auf den dynamischen Bereich und eine gegenüberstellende Durchführung von K0- und Oedometerversuch.

Im Zuge der technischen Untersuchungen sollte gleichzeitig eine weitere Beschreibung des regional typischen Auelehms stattfinden, sowie im Vergleich mit Karlsruher Sand, Betrachtungen zu einem schwer verdichtbaren Boden. Hiermit waren ebenfalls die Thematik und Prüfproblematik teilgesättigter Böden einzuschätzen und die Reproduzierbarkeit homogener Probekörper darzulegen. Den Rahmen dafür präsentieren Experimente zur Anregungsfrequenz, dynamische CU-Triaxialversuche an beiden Böden und eine Walzensimulation.

Die Realisierung von verschiedenen Simulationen mit Hilfe des Triaxialprüfgerätes musste die baupraktische Anwendung auf verschiedenste Vorgänge in bodenmechanischem Feld, Baumaßnahmen und Tiefbau-, bzw. Spezialtiefbauvorhaben, aufzeigen. Ausführliche grafische Analysen und Diskussionen der Ergebnisse aus Datenauslesungen bezüglich des Verformungsverhaltens galt es zu beleuchten.

2 Methodik

Die vorliegenden Ausführungen sind das Ergebnis einer intensiven interdisziplinären Zusammenarbeit mit der Nachwuchsforschergruppe G² Gruppe Geotechnik der HTWK Leipzig und dem Praxispartner und Hersteller der triaxialen Prüfanlage Geomation GmbH. Neben der Bereitstellung von Versuchsstand und Software durch die G² Gruppe Geotechnik, gelang über jene auch ein Treffen mit Experten der FCB GmbH Espenhain, die jahrzehntelange Erfahrungen auf dem Gebiet der triaxialen Prüfungen besitzen, zu arrangieren. Ein ständiger Kontakt zum Hersteller und dessen direkte Betreuung dieser Graduierungsarbeit wurden ebenfalls ermöglicht.

Über den gesamten Bearbeitungsraum hinweg erfolgte eine umfassende Absprache der vereinzelt Vorüberlegungen und Durchführungsabschnitte. Versuchsschemata für jede Versuchsreihe wurden mit Betreuern fachlich und technisch analysiert und daraufhin selbstständig absolviert. Durch die regelmäßige grafische Präsentation und Aufarbeitung der einzelnen Versuchsergebnisse zu bestimmten Zeitpunkten der Laborphase konnten Zwischenresultate besprochen und gegebenenfalls Änderungen für Folgeversuche im Anschluss an fachliche und technische Begutachtung vorgenommen werden.

Nach der zeitlichen Aufwandsanalyse für einzelne Durchführungsschritte begannen Probekörperherstellung, Laborversuche, Dokumentation, Auswertung und Zusammenfassung.

Die Laborversuche gliederten sich in mehrere Abschnitte mit Vorversuchen und mussten sehr flexibel in Bezug auf den Durchführungszeitraum angepasst werden, da teilweise schlecht abschätzbarer Programmier- und Beschaffungsaufwand von Versuchssteuerung und möglicherweise notwendiger technischer Ausstattung der Prüfanlage bestand, welche sich bis zum heutigen Zeitpunkt noch im Entwicklungsstadium befindet.

Infolge der Parameterfestlegung ließen sich die Versuche zur Kompression mit verhinderter Seitendehnung und K₀-Versuch zeitlich unabhängig voneinander ausführen. Restliche Experimente mussten jedoch nacheinander erledigt werden, um die Konsequenzen für Folgeversuche abzusehen. Dies umfasste die Untersuchung zur Anregungsfrequenz beider Böden, die Durchführung dynamischer CU-Triaxialversuche an den Böden mit einer Variation von Last- und Umlagerungsspannung und letztendlich die Simulation einer Walzenüberfahrt mit verschiedenen Teilschritten, wie die Überprüfung der manuellen Nachsteuerung.

Am Ende der Laborphase konnten Vergleiche von Datenexporten unterschiedlicher Art und ausführliche grafische Vergleiche illustriert werden. Parallel zum gesamten Prozess geschah die

ständige Aktualisierung der Übersicht zu Triaxialversuchen, sowie Dokumentation von Detaillösungen und Verbesserungsvorschlägen der Triaxialanlage.

Erfahrungen und Probleme bei Probenherstellung und Einbau wurden zusammengetragen, um dem ungeschulten Auge die wichtigsten Details nahezubringen und reproduzierbare Vorgänge zu ermöglichen.

Die Erarbeitung von Protokollen und Versuchsanleitungen mit knappen Beschreibungen zum einfachen Verständnis vieler vereinzelter Sachverhalte war ebenfalls Bestandteil der Auswertung. Gleichzeitig erfolgte die Ausarbeitung einer umfangreichen Sammlung an Abkürzungen und Begriffen, die dieses Thema umfassen.

3 Stand des Wissens

3.1 Normierung triaxialer Laborversuche

Auf dem Gebiet der bodenmechanischen Laboruntersuchungen nehmen Triaxialversuche einen sehr speziellen Platz ein. Da sie nicht nur messtechnisch und theoretisch sehr komplex sind, sondern auch einen hohen Zeitaufwand in Anspruch nehmen, ist plausibel, warum sich wenige Institute und Labore mit diesem Feld beschäftigen. Hinzu kommt, dass relevante Normen, wie die DIN 18137-2, den Bereich Triaxialversuche mangelhaft abdecken. Sie beschäftigen sich mit gesättigten Böden, was natürlich auch die strengste Bedingung darstellt. Ein weiterer Hintergrund kann die Bestimmung der Volumenänderung des Prüfkörpers über die verdrängte Wassermenge sein. Andere Normen zum Gebiet sind:

- DIN 18137-1 (Begriffe und Randbedingungen),
- DIN 18137-2 (Durchführung statischer Triaxialversuche),
- DIN ISO/TS 17892 Teil 8 und 9 (Versuchsaufbau und statische Triaxialversuche).

Einzelne Richtwerte signalisieren, dass von Probekörpern sehr geringen Volumens ausgegangen wurde. Außerdem beschreiben diese Normen ausschließlich statische Versuche, obwohl zyklische und dynamische Simulationen am Boden relevanter für die Optimierung und Modifizierung von Baugrund sind, sowie für die ursprüngliche Anwendung im Bereich der Erdbebensicherheit von Konstruktionen. Die meisten Lehrbücher zum Thema beschäftigen sich lediglich mit den Inhalten der Norm. Fachliteratur und wissenschaftliche Publikationen in den Bereichen der Geotechnik und Bodendynamik geben jedoch einen tieferen Einblick in Anwendung, Aufbau, Durchführung und Hintergrund. Da die Untersuchung von Fragestellungen zu statischen und zyklischen, bzw. dynamischen Triaxialversuchen ihren Schwerpunkt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hatte und in diesem Zeitraum sehr viele einzelne Forschungsberichte vorhanden sind¹, erfolgte in den letzten 20 Jahren eine Validierung und Zusammenfassung dieser Ergebnisse mit Hilfe verbesserter elektronischer Datenverarbeitung.

3.2 Funktion und Grenzen triaxialer Prüfmaschinen

Triaxiale Versuchsstände sind in der Lage eine Vielzahl an Parametern zu steuern und aufzuzeichnen. Im Prinzip besteht jede Prüfeinrichtung aus einer Druckzelle, die sich aus äußerem und innerem System mit Prüfkörper zusammensetzt, und der Prüfpresse, welche in der Lage ist statische, dynamische oder kombinierte Belastungen aufzubringen, sowie

¹ GILBERT, Paul A. (1984). Investigation of density variation in triaxial test specimens of cohesionless soil subjected to cyclic and monotonic loading. Final Report. Department of the Army. Waterways Experiment Station. Vicksburg.

elektronische Datenverarbeitung durchzuführen.² Eine Reihe von Steuer- und Messgeräten hat dabei die Funktion Zelldruck und Axialdruck (statisch/dynamisch) im äußeren und Porenwasserdruck im inneren System der Druckzelle zu variieren und gleichzeitig axiale und radiale Last, Probekörperstauchungen und -dehnungen, sowie den Porenwasserdruck festzuhalten. Somit sind konsolidierte, unkonsolidierte, dränierte und undränierte triaxiale Versuche möglich.³ Im Vergleich zu einaxialen Kompressionsversuchen und direkten Scherversuchen verhilft eine Triaxialanlage zu einer besseren Variation und Registrierung von Parametern. In dynamischen Untersuchungen bedeutet dies die Feststellung von E-Modul, Dämpfung und Festigkeitseigenschaften als Bodenkennwerte.⁴

Zylindrisch eingebaute Probekörper bieten den Vorteil, dass der Zelldruck, der durch entlüftetes destilliertes Wasser mit Hilfe von Druckluft oder anderer Steuerungstechnik aufgebracht wird, zwei Normalspannungen, nämlich σ_2 und σ_3 , darstellt. So kommt es auch in der Literatur zu unterschiedlicher Benennung dieser Komponente, wie etwa nur σ_3 oder $\sigma_{2/3}$, welche im Endeffekt ein und dasselbe bedeuten können. Triaxiale Prüfmaschinen sind demzufolge nicht in der Lage σ_2 und σ_3 separat voneinander zu steuern. Dies erfolgt gemeinsam und daher wäre die Bezeichnung einer triaxialen Belastung unter diaxialer Steuerung eher zutreffend. Zusätzlich ist es mit dem heutigen Systemen nicht möglich bewusst Schubspannungen τ einzubringen, denn dazu wäre eine komplexere Steuerung des Zelldruckbereiches erforderlich.

Die Softwareanpassung für einzelne baupraktische Anwendungen ist teils sehr zeitaufwendig und die Vorgabe von Eingangsparametern bedarf eines hohen Erfahrungsgrads in Bodenmechanik, Geotechnik und Bodendynamik.

3.3 Problembeschreibung für teilgesättigte Prüfungen

BECKER stellte 2012 sehr ausführlich die verschiedenen wissenschaftlichen Meinungen in Bezug auf das Verhalten von teilgesättigten Böden bei Triaxialversuchen gegenüber.⁵ Die Herausforderung liegt, wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, in der Steuerung und Messung aller Phasen des Bodens, wobei die Grenzfläche zwischen Porenluft und Porenwasser schwer bis nicht registrierbare Auswirkungen auf das Verformungsverhalten innehat. Für eine genaue Untersuchung von teilgesättigten Böden müssten Steuergeräte für Porenwasserdruck und Porenluftdruck, sowie Messgeräte dafür vorhanden sein. Ferner ist es notwendig die Versuchssteuerung mit Daten hinsichtlich der Modelle physikalischer und chemischer Vorgänge

² Anhang H verfügt über eine grafische Übersicht der zur Verfügung stehenden technischen Komponenten im bodenmechanischen Prüflabor der HTWK Leipzig.

³ Anhang G: aktuelle Version der Übersicht zu Triaxialversuchen.

⁴ STUDER 2007: Bodendynamik, S. 85: Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht zu Labor- und Feldversuchen bezüglich dynamischer Bodenkennwerte.

⁵ BECKER 2012: Materialverhalten eines teilgesättigten bindigen Bodens unter zyklischer Belastung, S.4-9.

zu speisen. Als Beispiel dafür seien an dieser Stelle nur die Saugspannung der Grenzfläche, als Zone ohne Volumen aber mit Spannung, und der Effekt von salzhaltigen Porenwasser, welches einen osmotischen Druck⁶ verursacht, aufgeführt.

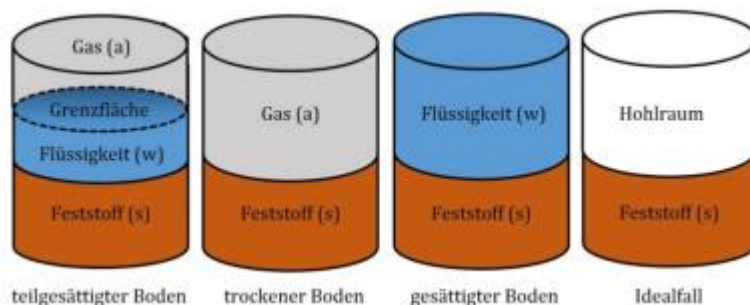


Abbildung 1: Dreiphasenmodell des Bodens.

Um Steuerung und Messung des Luftporendrucks zu realisieren, ist es zum einen erforderlich Druck auf die Luftporen zubringen und andererseits die Volumenänderung dieser Gasphase zu messen.⁷ Abbildung 2 zeigt das Verhalten von Böden unterschiedlichen Wassergehaltes bei zyklischer Belastung auf.

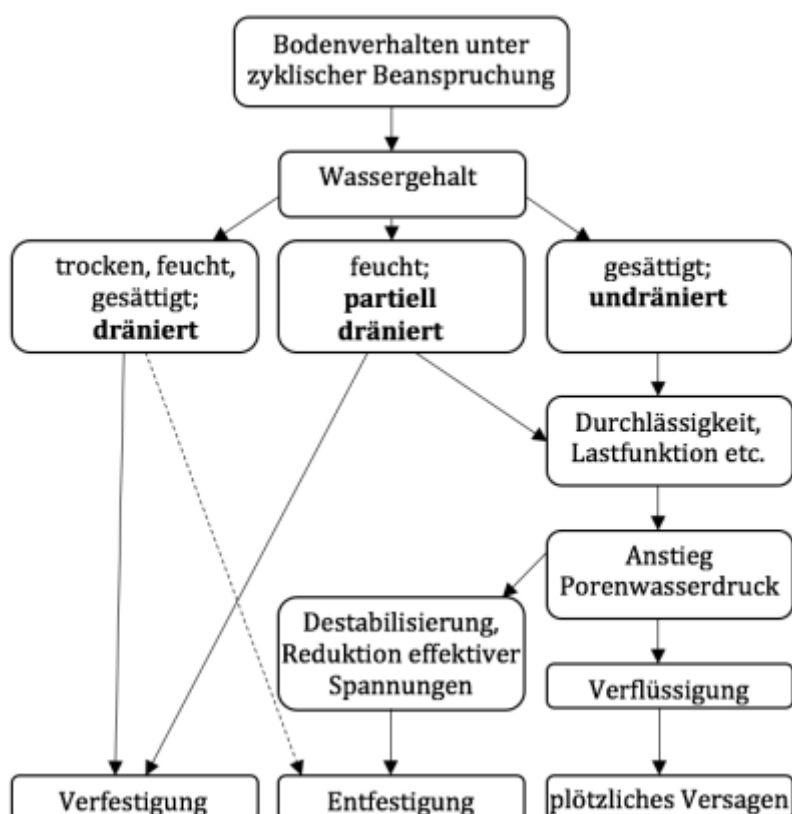


Abbildung 2: Schema zum Einfluss dynamischer und zyklischer Belastung auf Böden.⁸

⁶ KOLYMBAS 2007: 7.2 Osmotische Saugspannung, S. 110.

⁷ REES Part 2 (GDS Instruments): siehe Anhang G: Übersicht Triaxialversuche.

⁸ STUDER 2007: Bodendynamik, S. 80, Bild 4.29.

4 Herstellung und Einbau von Probematerial

4.1 Allgemeines

Für Laboruntersuchungen sind fortlaufend gleiche Ausgangsbedingungen sicherzustellen, weswegen die Herstellung der Probekörper für Triaxialversuche einen sehr hohen Stellenwert einnimmt. Der oberste Grundsatz ist stets, dass eine Probe während Herstellung und Einbau minimal beeinträchtigt wird. Speziellere Anforderungen, wie eine homogene Dichte nicht nur von Probekörper zu Probekörper, sondern auch über den Querschnitt jedes einzelnen hinweg, können über komplexere Verfahren realisiert werden. GILBERT (1984)⁹ beschreibt in seiner Arbeit detailliert die relevanten Schritte zur Kontrolle und Gewährleistung einer homogenen Dichte mittels Gefrierprozessen. Wenn Probekörper als Bohrkern im Feld entnommen werden, sollen Gefüge und Festigkeit bei diesem Vorgang unverändert bleiben. Der Wassergehalt wird durch zügiges Vorgehen und die Anwendung einer Gummihülle oder eines engen, luftdichten Behälters geschützt. DIN 18137-2 (2011, S. 18 ff.) bietet Ansätze für das Vorgehen bei standfesten und nichtstandfesten, bindigen Proben, sowie aufbereiteten Böden. Nichtstandfeste nichtbindige Böden werden dabei nicht aufgeführt, wobei hier möglicherweise ein zuvor erwähnter Gefrierungsprozess Anwendung finden könnte. Eine Kontrolle von Wassergehalt und Abmessungen des Probekörpers ist jederzeit erforderlich, also auch nach Abschluss des Scherversuches, bzw. dem Ausbau aus der Druckzelle.

In dieser Bachelorarbeit wurden Auelehm (TL) und Karlsruher Sand (SE) als zu untersuchende Böden gewählt. Der Auelehm wurde von einer Dammbaustelle in Löbnitz (Nordsachsen) akquiriert und der Karlsruher Sand war bereits im Labor vorrätig vorhanden. SE ist ein schwer verdichtbarer Boden, der aufgrund eines hohen Porenanteils ein gutes Verformungsverhalten aufweist. Im Raum Leipzig ist Auelehm ein häufig vorkommendes feinteilhaltiges Material und somit interessant für Laboruntersuchungen. Die Probekörper (TL) wiesen einen Wassergehalt von 14,3 % (siehe Anhang A.1) auf, was mit einer 97%igen Proctordichte korreliert (Anhang A.2). Eine Betrachtung der Durchschnittswerte aller TL-Feuchtdichten in Bezug auf den Wassergehalt ergab jedoch, dass eine mittlere Trockendichte von $1,76 \text{ g/cm}^3$ vorlag. Dies entspricht 100% der Proctordichte, stellte aber kein Problem dar, da eine Verdichtung über 100% möglich ist. Maximaler Ausgangswert war 102% Proctordichte bei Probekörper T24, welcher für den K0-Versuch verwendet wurde. Auelehm wird beispielsweise für den Einbau in Dammkonstruktionen verwendet um Unterbau und Zwischenschicht zu realisieren. In den folgenden Kapiteln wird aufgezeigt, dass unter anderem genau dieser baupraktische Hintergrund nachgestellt wurde, indem ein vorverdichtender Einbau erfolgte und nach diesem

⁹ nach GILBERT (1984) Part 2 Experimental Procedure (S. 11-30): Reconstitution, Initial Freezing, Lathing, Placement in Triaxial Chamber, Thawing, Saturation, Consolidation, Loading, Refreezing, Dissection, Analysis, Numerical Evaluation.

frischen Einbau eine dynamische Nachverdichtung, bzw. Belastung, mit einem Zeitfenster von 2 Stunden (Konsolidation) stattfand. Karlsruher Sand ist ein enggestufter Sand und feinteilarm.¹⁰ Durch diese Eigenschaften verschafft SE eine günstige Grundlage zur Untersuchung der Verformungseigenschaften im dynamischen Bereich und ermöglicht einen einfachen und leicht reproduzierbaren Probeneinbau. Um Komplikationen im Ablauf zu verringern wurden alle drei Druckzellen (50mm) im Vorfeld neu abgedichtet, auf Vollständigkeit und Vollzähligkeit geprüft und sämtliche Ventile beschriftet, gereinigt und mit Druckluft alle Bauteile auf Funktion geprüft. Durch das Anlegen von kopfseitigem Unterdruck können Lufteinschlüsse während des Einbaus verhindert werden.

4.2 Vorbereitung und Einbau von Auelehm (TL)

Die Sicherung des Probenmaterials erfolgte am 18.05.2016 an einer Deichbaustelle in Löbnitz im Norden von Sachsen. Im Anschluss wurde das Material geschützt, luftdicht bei verhinderter Sonneneinstrahlung gelagert und der Wassergehalt bestimmt, sowie vom 19.05.2016 auf den 20.05.2016 24 Probekörper (T11 bis T34) hergestellt. Probekörper T25 bis T34 dienten als Reservematerial. Diese hohe Anzahl an Reservekörpern wurde gewählt, da in Probenvorbereitung, -einbau und Versuchssteuerung der verschiedenen Experimente Komplikationen der Abläufe zu erwarten waren. Die Notwendigkeit zusätzlicher Vorversuche konnte nicht ausgeschlossen werden. Jeder Probekörper wurde in der im Folgenden beschriebenen Reihenfolge einzeln selbstständig angefertigt.

Bei der lagenweisen Verdichtung mittels automatischen Proctor wurden ein Zylinder mit einem Innendurchmesser von 100 mm und einer Höhe von 120 mm, sowie ein Aufsatz verwendet. Im Anschluss erfolgten die vorsichtige Abnahme des Aufsatzes und eine Bearbeitung der überstehenden Oberfläche mittels Stahllineal mit Schneide. Daraufhin begann ein langsames hydraulisches Auspressen des Probekörpers aus dem Proctortopf. Eine anschließende Aufnahme von Durchmesser, Höhe und Gewicht mit digitalen Messschieber und Waage, ging der Reinigung des Proctortopfes und der sorgfältigen Lagerung in luftdichter Folie voraus.

Tabelle 1: Feuchtdichten der Probekörper (TL, $d_0=100\text{mm}$).

Proben 100mm [Nr.]	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19
Feuchtdichte [g/cm^3]	2,03	2,03	1,94	2,00	1,95	1,97	2,00	2,03	2,03
Proben 100mm [Nr.]	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28
Feuchtdichte [g/cm^3]	2,03	2,04	2,05	2,04	2,06	2,04	2,04	2,04	2,05
Proben 100mm [Nr.]	T29	T30	T31	T32	T33	T34			
Feuchtdichte [g/cm^3]	2,03	2,03	1,94	2,00	1,95	1,97			

¹⁰ Im Bodenmechanischen Datenblatt (Anhang A.3) sind nähere Informationen zum Probenmaterial Karlsruher Sand aufgeführt.

Eine Verwendung von kleineren Druckzellen führt zu geringerem Verbrauch von entlüftetem destilliertem Wasser.¹¹ Gleichzeitig ermöglicht dies die parallele Vorbereitung der Probekörper für Versuchsreihen, denn für Probekörper bis 50 mm drei Zellen zur Verfügung standen und für Größen bis 100 mm Durchmesser nur eine Druckzelle, die durch ihr hohes Gewicht im befüllten Zustand Transportprobleme hervorruft. Ein zügiger Ablauf, sowie intensive Ausnutzung der Triaxialanlage sind dabei bewusst induzierte Effekte. Diese Vorgehensweise ist für die Durchführung von Aufträgen zu statischen triaxialen Versuchen empfehlenswert, da hier jeweils drei Teilversuche zur Konstruktion der Spannungskreise und Berechnung von Kohäsion und Reibungswinkel nötig sind.

Zur Herstellung von TL-Probekörpern im Durchmesser 50 mm wurden Proben im Durchmesser von 100 mm mit Hilfe eines Ausstechzylinders für bindige Böden und einer hydraulischen Presse direkt vor dem Probeneinbau angepasst.

Tabelle 2: Feuchtdichten der Probekörper und Verwendung (TL, $d_0=50\text{mm}$).

Proben 50mm [Nr.]	Feuchtdichte [g/cm³]	Verwendung
T11	2,03	Sättigung
T12	2,03	Konsolidation
T13	-	Oedometerversuch
T14	2,00	Anregungsfrequenz 1 Hz
T15	1,93	Anregungsfrequenz 15 Hz
T16	1,93	Anregungsfrequenz 30 Hz
T17	1,99	Anregungsfrequenz 60 Hz
T18	1,99	Variation 0,5 m 60 Hz
T19	1,98	Variation 1,0 m 60 Hz
T20	1,99	Manuelle Nachsteuerung
T21	1,98	Variation 2,5 m 60 Hz
T22	2,04	Walzenüberfahrt Phase 1
T23	2,04	Walzenüberfahrt Phase 2
T24	-	K0-Versuch, Querdehnung

Für die Sicherstellung eines homogenen Probekörperbildes ist eine Kontrolle der Feuchtdichte dieses Prozesses vonnöten. Abbildung 3 liefert hierzu den Vergleich der Feuchtdichten aus Tabellen 1 und 2. Ebenso liefert Tabelle 2 einen Überblick zum zeitlichen Ablauf, bzw. schrittweisen Vorgehen und Inhalt der Experimente am Triaxialstand. Es ist festzustellen, dass

¹¹ Kapitel 5.2 zeigt auf, dass große Druckzellen teilweise mehr als die dreifache Menge an entlüfteten destillierten Wasser verbrauchen. Der Entlüftungsprozess für 20 Liter destilliertes Wasser nimmt mit der vorhandenen Einrichtung (Kompressor mit Unterdruck) bis zu 8 Stunden in Anspruch.

das verwendete Ausstechverfahren geeignet ist, denn die Dichten schwanken um $0,05 \text{ g/cm}^3$. Dies ist gleichzeitig ein Zeichen für eine homogene Dichte im horizontal betrachteten Probekörper.

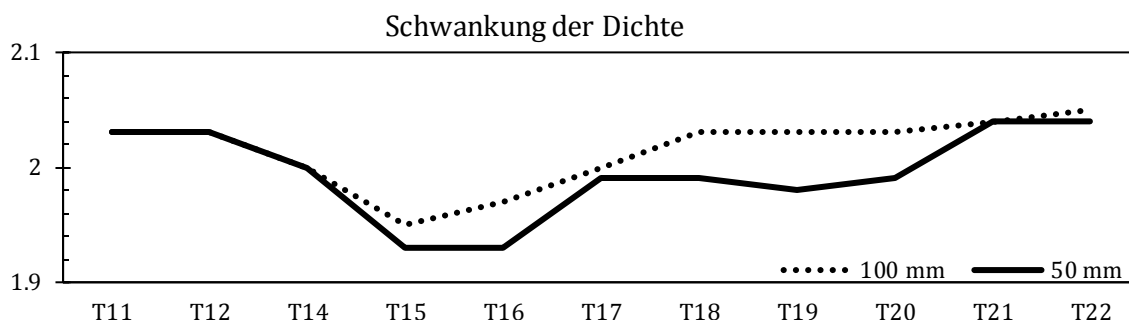


Abbildung 3: Feuchtdichten der TL-Probekörper bei $d=100 \text{ mm}$ und $d=50 \text{ mm}$ im Vergleich.

Transport des ausgestochenen 50 mm Probekörpers für den Einbau in die Druckzelle geschah im Ausstechzylinder horizontal. Dieser wurde dann, durch den Filterstein unterseitig vorm Herausfallen geschützt, horizontal auf das Bodenstück der Druckzelle aufgerichtet und im Anschluss der Ausstechzylinder vorsichtig abgezogen. Dies geschah mit einer Drehbewegung und das Abheben des Probekörpers konnte durch einen Stahlstempel im Durchmesser 50 mm verhindert werden.

Ab diesen Zeitpunkt ist der Einbau in große und kleine Druckzelle identisch und vereinfacht grafisch aufgeführt in Anhang H: Technische Systemübersicht.

Nach dem Aufsetzen von kopfseitigem Filterstein und weißem Stempeladapter, erfolgte der Einschluss in die Membran mittels Kompressor und Führungsrohr im entsprechenden Durchmesser. Vollständige Trennung von äußerem und innerem System vollzog sich beim Aufziehen von drei Gummiringen zur finalen Abdichtung des inneren Systems. Es ist ratsam diese drei Gummiringe mit Hilfe des Führungsrohres oder einer Stahlspange aufzubringen, um eine Beeinträchtigung der Probe auszuschließen. Ebenfalls ist es umsetzbar, die zwei unteren Gummiringe bereits vor dem Aufsetzen der Probe überzuziehen. Eingeschlossene Luft im inneren System kann mit Hilfe des Kompressors abgesaugt werden. Der Anschluss dazu findet am kopfseitigen weißen Stempeladapter statt. Hier ist gleichermaßen die Anschlussmöglichkeit für die kopfseitige Dränage gegeben. Im Anschluss werden Gehäuse und Kopfplatte mit drei Stangen, sowie oberen und unterem Dichtungsring, festgezogen. Das Befüllen der Druckzelle mit entlüftetem destilliertem Wasser zum Aufbau des Zelldruckes für die Triaxialversuche geschieht fußseitig über das σ_3 -Ventil. Auf das Entweichen der eingeschlossenen Luft mittels kopfseitigen Luftventil ist zu achten. Weiterhin ist die Arretierung des Kopfstempels per Kopfstück mittels Feststellschraube durchzuführen, um Schäden am Probekörper während Einbau, Befüllung oder Transport zu verhindern.

4.3 Einbau von Karlsruher Sand (SE)

Wie im bodenmechanischen Datenblatt (Anhang A.3) zu sehen ist, handelt es sich hierbei um einen enggestuften Sand. Der Einbau in die triaxiale Druckzelle erfolgte bei den Versuchen zur Anregungsfrequenz locker mit aufklappbarem Former und Kompressor mit Membran direkt auf dem Fußstück der Druckzelle mit Filterstein. Für die Folgeversuche wurde ein dichter Einbau mit einer Amplitude von 0,6 in drei Schritten je eine Minute am Rütteltisch als idealste Variante ermittelt. Tabelle 3 führt hierzu die gemessenen Dichten und Zuordnung zum jeweiligen Versuchsabschnitt auf. Der Wassergehalt des vorliegenden Materials bezog sich auf 2 bis 3 %.

Tabelle 3: Einbaudichten von Karlsruher Sand bei lockerem und dichtem Einbau in die triaxiale Druckzelle.

Versuch	Anregungsfrequenz				Variation		
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Probekörper							
Einbaudichte [g/cm ³]	1,52	1,52	1,53	1,54	1,68	1,66	1,66

Anbringen der Abdichtungsringe, sowie Entlüftungsprozess, Installation von Gehäuse und Kopfplatte und Befüllung mit entlüftetem Wasser sind mit dem Einbau von TL identisch. Die Herstellung der Probekörper erfolgte immer direkt vor dem Versuch da hierfür ein geringer Zeitaufwand notwendig war.

4.4 Komplikationen und Empfehlungen in Herstellung und Probeneinbau

Um bindige Proben möglichst homogen und ungestört herzustellen und in eine Druckzelle für Triaxialversuche einzubauen, müssen viele Details beachtet werden. Zur Optimierung des Arbeitsaufwandes, wurden genügend Auelehm-Proben und Reserveproben mit dem gleichen Wassergehalt von 14,3 % hergestellt. Beim Ausstechen der Auelehm-Probekörper auf 50 mm, kam es anfangs zu Brüchen in genau den drei Zonen die lageweise charakteristisch sind für die normgerechte Verdichtung mittels automatischen Proctor.



Abbildung 4: Zonenbruch, Ausstechequipment und drei vollständige Druckzellen von TL.

Zwecks Verhinderung von Brüchen wurde anfangs versucht die Probe direkt aus dem 100 mm Proctortopf mit Hilfe der hydraulischen Presse und des Ausstechzylinders von 50 mm zu gewinnen. Dies schlug jedoch fehl und der Proctortopf wurde im Fortgang nicht weiter verwendet.

Anhand der Dichte-Kontrolle (Abbildung 3) ist ersichtlich, dass angesichts der im Folgenden beschriebenen Vorgehensweise ein 50 mm Probekörper ohne Veränderung der Dichte aus einem 100 mm Probekörper hergestellt werden konnte. Dabei wurde der Originalkörper, T11 genannt, in eine hydraulische Presse gestellt und darauf der Ausstechzylinder 50 mm. Da Kopf des Ausstechzylinders und Fuß des Probekörpers mit breiten Metallscheiben belegt waren, fiel es nicht schwer den Ausstechzylinder mittels Hydraulik vorsichtig in den Originalkörper einzudrücken und so den neuen Probekörper zu gewinnen. Jener wurde im Ausstechzylinder gemessen und anschließend bewegungsarm direkt auf das Fußstück der Triaxialdruckzelle mit Filterstein aufgebracht. Alternativ könnte für eine geringere Wandreibung beim Ausstechen auch ein Ausstechzylinder aus Plastik verwendet werden, der zuvor mit zwei verstellbaren Schlauchschellen etwas zusammengedrückt wird, um nach dem Ausstechen durch deren Lockerung ein leichtes Herauslösen des Probekörpers zu gewährleisten. Damit man anschließend weitere Einwirkungen auf den nun sehr anfälligen Probekörper vermeiden wollte, wurde dieser sofort in die Druckzelle eingebaut und mittels Kompressor und Ansaugzylinder in eine Latexhülle gesichert.

Falls Prüfkörper im gefrorenen Zustand vorliegen, empfiehlt es sich einen erhitzten Ausstechzylinder, der eventuell in warmem Wasser gelagert wurde zum Ausstechen von Material zu verwenden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Ausstechzylinder nicht eine zu große Hitze abstrahlt, die Einfluss auf die gefrorene Hauptstruktur nimmt.

Eine ständige Kontrolle der Abdichtung und richtigen Anordnung der Dichtungsringe zur Halterung der Membran und Abdichtung von Kopf- und Fußplatte ist sehr empfehlenswert, denn hier kann es infolge kleiner Fehler bereits zum Versagen des gesamten Mechanismus der Apparatur kommen. Eingeschlossene Luftansammlungen zwischen Membran, Probekörper und Filtersteinen können durch das Anlegen eines kopfseitigen Unterdruckes vermieden werden. Für Sandproben ist aufgrund der Instabilität des Probenzylinders ein dichter Einbau zu empfehlen, wenn es sich um Proben mit geringem Durchmesser (< 70 mm) handelt.

5 Der K₀-Versuch

5.1 K₀-Versuch und einaxialer Kompressionsversuch

Der K₀-Test ist eine Sonderform von Triaxialversuchen und vergleichbar mit einem Oedometerversuch (Last-Setzungs-Versuch). Axiale und radiale Belastung auf einen Boden in bestimmter Tiefe stehen im Ruhezustand in einem Verhältnis, welches durch den sogenannten Erdruhedruckbeiwert (K₀-Wert) ausgedrückt wird.

Im Oedometerversuch ist die radiale Ausdehnung verhindert und genau dies musste messtechnisch und steuerungstechnisch mit der Triaxialanlage umgesetzt werden. Herkömmlicherweise wird mit Hilfe von Radialsensoren, die in der Druckzelle am Probekörper angebracht sind, die radiale Dehnung gemessen und mit Hilfe dieser Information der Zelldruck nachgesteuert. Da Radialsensoren zum Zeitpunkt der Experimente nicht zur Ausstattung der Triaxialzelle gehörten und die Programmierung der Versuchssteuerung zur Nachsteuerung des Zelldruckes anhand der durch radiale Ausdehnung geschehenden Wasserverdrängung sich als zu komplex herausstellte, wurde eine dritte Methode durchgeführt, die im Kapitel 5.3 abgehandelt wird.

Charakteristisch für den K₀-Versuch ist, dass die verhinderte Radialdehnung messtechnisch erfasst wird und keine Wandreibung auftritt.

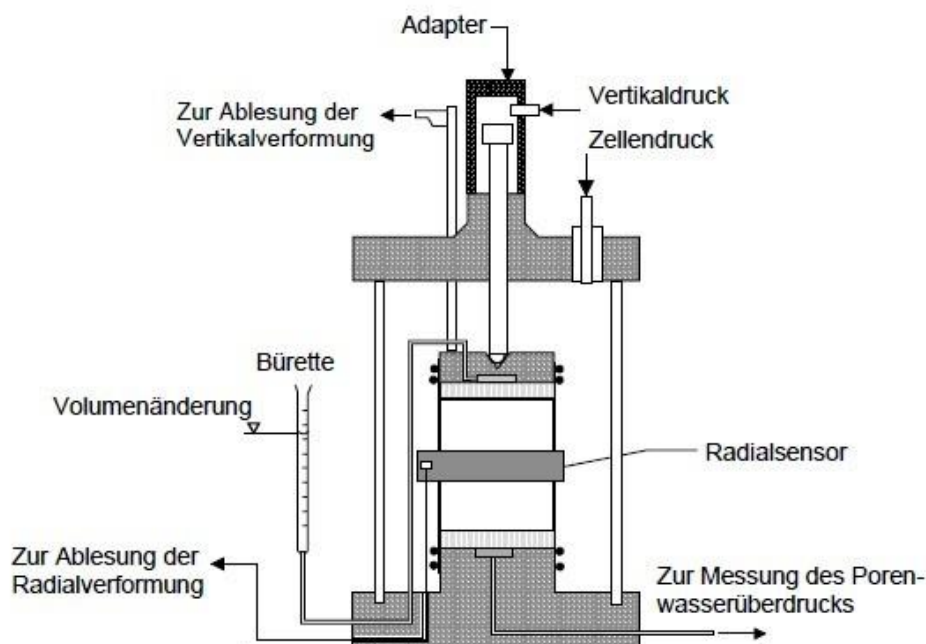


Abbildung 5: Schematische Anordnung zum Versuchsaufbau eines K₀-Versuchs.¹²

¹² Quelle: BASSEM 2012: Materialverhalten eines teilgesättigten bindigen Bodens unter zyklischer Belastung, S. 69.

HORNIG führte bereits 2007 einen Vergleich zwischen Oedometertest und K0-Versuch durch und stellte fest, dass bei vorbelasteten, überkonsolidierten, verfestigten und festen Böden Oedometerversuche ungenauer sind, Oedometertests unter Erstbelastung viel zu kleine und unter Wiederbelastung zu kleine oder viel zu große Steifemodule, sowie zu hohe Werte für Setzungen erbrachten. Die Ursache dafür wird im Probeneinbau und den Probenabmessungen gesehen, da HORNIG die Probenüberreste des Oedometerversuches für den K0-Versuch benutzte, was der Vorteil der Triaxialdruckzelle ist, denn diese ist in ihren Probenabmessungen nicht derartig eingeschränkt wie die Oedometerringe. Messergebnisse konnten mit Plattendruckversuchen an Einzelfundamenten und einer Fundamentprobelastung als Großversuch verglichen werden.

5.2 K0-Versuch mit Wasserverdrängung

Wie bereits erwähnt, wurde die Möglichkeit in Betracht gezogen, die Radialdehnung anhand der Wasserverdrängung aufzunehmen. Grundlage für diesen Gedankengang ist die Annahme, dass maximale Verformungen im mittleren Drittel des Probekörpers zu erwarten sind und die Mantelfläche als maximale Fläche durch den Zelldruck gesteuert wird.

Die nachfolgende Tabelle 4 führt Vorüberlegungen zur Auswahl der Probekörpermaße für einen K0-Versuch auf. Dazu wurde die Dehnung von Auelehm aufgrund von vorangegangenen UU-Versuchen mit 0,08 % angenommen und verglichen, welche Wasserverdrängung zu erwarten ist, je nach Probekörpermaßen und Verwendung einer kleinen oder großen Druckzelle. Als wirtschaftlichste Variante gilt eine Probe mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Höhe von 12 cm, da hier eine geringe Menge entlüftetes destilliertes Wasser benötigt wird und dennoch eine verhältnismäßig große Verdrängung von Zellwasser zu erwarten ist.

Tabelle 4: Vergleich der möglichen Wasserverdrängung verschiedener Druckzellen und Probekörpergrößen.¹³

gew ε	d [cm]	h[cm]	ΔV [ml]	Vc [ml]	Vc/ ΔV
0,08	5	12	18,8495559	1100	58,3568125
0,08	7	7	21,5513256	8000	371,206864
0,08	7	12	36,9451296	7800	211,123904
0,08	10	12	75,3982237	7300	96,819257
0,08	10	25	157,079633	6300	40,1070457

Wie bereits erwähnt gestaltete sich die Programmierung der Versuchssteuerung als zu schwierig und es wurde auf eine andere Variante zurückgegriffen.

¹³ Δh = Setzung, V_0 = Anfangsvolumen, ε = 8% Dehnung entnommen aus Voruntersuchungen (UU-Versuch), $h * \Delta V = \Delta h$, $\Delta V = \varepsilon * h_0$, $\Delta V = \pi/4 * h_0 * d^2 * \varepsilon$ (in cm gibt ml der verdrängten Wassermenge).

5.3 K0-Versuch mit Querdehnung

Aufgrund steuerungstechnischer und ausstattungstechnischer Herausforderungen wurde der Zelldruck anhand des Querdehnungsparameters ν (Poisson-Zahl)¹⁴ nachgesteuert. Diese wurde auf 0,35 festgelegt. Tabelle 5 führt die damit verbundenen Eingangsparameter auf. Die axiale Belastung aus dem Oedometerversuch wurde für den K0-Versuch übernommen und daraus ergaben sich die Radialspannungen σ_3 der einzelnen Laststufen für die Triaxialanlage. Mit einer Laufzeit von acht Stunden je Laststufe, wobei beim einaxialen Kompressionsversuch 3,5 Tage gewählt wurden, um die Achtstundenmarke hinreichend aufzuzeichnen, betraf die Gesamtlaufzeit unabhängig voneinander knapp eineinhalb Tage.

Tabelle 5: Zelldrucknachsteuerung mit $\nu=0,35$. $\sigma_3=\sigma_1*\nu/(1-\nu)$.

Laststufe	σ_1 [kN/m ²]	σ_3 [kN/m ²]
1	25	13,46
2	50	26,92
3	100	53,85
4	200	107,69

Probekörperabmessungen wichen wegen des Einbringens in den Oedometerring in den Versuchen voneinander ab. Der Probekörper T13 wurde in die Stahlform eingepasst mit einem Durchmesser von 70 mm und einer Höhe von 19,9 mm, was in einem Gesamtvolumen von 76,584 cm² resultierte. Im Triaxialversuch hingegen konnte der komplette Probekörper T24 verwendet werden. Aus der Höhe 12,1 cm und dem Durchmesser 10 cm, resultierte ein Volumen von 945,62 cm². Obwohl die Durchmesser nur um 3 cm voneinander abweichen, verursachen sie in Kombination mit der Höhe eine Volumendifferenz von 91,9 %.

¹⁴ nach K. Simmer. Grundbau 1: Bodenmechanik, Erdstatische Berechnungen. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH(18. Auflage).

6 Dynamische Triaxialversuche

6.1 Vorbetrachtungen

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf zwei Hauptfelder. Zum einen dynamische CU-Versuche an SE und TL und andererseits die Simulation einer Walzenüberfahrt an TL. Für beide Experimente waren Vorversuche notwendig. Zur besseren Strukturierung und Analyse wurden für jede Versuchsreihe Durchführungsschemata¹⁵ erstellt und mit technischen und fachlichen Betreuern hinsichtlich der Parameter, Durchführbarkeit und bautechnischem Hintergrund intensiv diskutiert. Während und nach den einzelnen Abschnitten erfolgte die grafische Präsentation der Ergebnisse, um Schlussfolgerungen für Folgeparameter, Fehleranalysen und Grenzen im Arbeitsbereich der Triaxialanlage festzustellen.

6.2 Sättigung und Konsolidation

Nach deutscher Norm ist es erforderlich Probekörper zu sättigen. Hintergrund dafür ist die Generierung des ungünstigsten Zustandes, sowie die zu hohen technischen Anforderungen an Triaxialgeräte zur Erfassung der Interaktion von Luftporen und Porenwasser. Die Sättigung erfolgt üblicherweise durch Aufbau eines Porenwasserdruckgefälles an kopf- und fußseitiger Drainage der Druckzelle. Dies kann pneumatisch oder direkt durch die Triaxialanlage stattfinden. Der B-Test ist als Kontrolle empfehlenswert.¹⁶ Da Sättigungsvorgänge bis zu einer Woche oder länger andauern können, wurde aufgrund der Zeitkomponente und der technischen Laborausstattung auf die Sättigungsphase verzichtet.

Die Konsolidation¹⁷ dient der Versetzung des Prüfkörpers in einen Anfangs- oder Ursprungszustand und kann somit verschiedenste bautechnische Hintergründe simulieren. Für einige der Folgeversuche wurde eine Konsolidationszeit von zwei Stunden gewählt, um einen derartigen Anfangszustand zu erzeugen. Bautechnisch gesehen wurde der Boden (TL) also zwei Stunden vor einer bestimmten Einwirkung oder Verdichtungsmaßnahme in eine bestimmte Tiefe eingebracht. Insbesondere bei weniger standfesten Böden (SE) ist darauf zu achten, auch abhängig vom Probekörperdurchmesser, dass Zelldruck und Axialdruck langsam und gleichzeitig, eventuell sogar schrittweise, aufgebaut werden, weil es sonst bereits während der Konsolidationsphase zum Bruch kommt. Eine schrittweise Applikation von Zelldruck sollte durch Induktion von Zelldruck vor Axialdruck erfolgen. Herkömmlicherweise ist die isotrope Konsolidation üblich.

¹⁵ Siehe Anhänge: C.1 Versuchsschema Anregungsfrequenz, D.1 Versuchsschema zyklische/dynamische CU-Versuche, E.1 Versuchsschema Simulation Walzenüberfahrt.

¹⁶ Protokoll B-Test: siehe Anhang I.

¹⁷ Definitionen zur Konsolidation finden sich im Glossar.

6.3 Versuche zur Anregungsfrequenz

Um eine geeignete Frequenz für Folgeversuche zu bestimmen, ist eine Untersuchung hinsichtlich der Datenerfassung und des Arbeitsbereiches der Triaxialanlage erforderlich gewesen. Die Möglichkeit einen Bodenkörper von 1 bis 90 Hz, oder drei Proben in Stufen von 1-20, 21-40 und 41-60 Hz¹⁸ hintereinander zu prüfen ist nicht geeignet, da dieser Probekörper demzufolge verschiedenste Frequenzen durchlaufen hätte und keine Aussage zu einer bestimmten Frequenz mehr gesichert wäre. Eine Bestimmung relevanter Einzelfrequenzen bezüglich der in Tabelle 6 aufgeführten Ausgangsparameter war aus diesem Grund nötig.

Tabelle 6: Phase 1 Anregungsfrequenz: Eingangsparameter im Versuchsschema.

	A1 TL	A2 SE
Axialdruck σ_1 [kN/m ²]	20	20
dyn. Auflast σ_d [kN/m ²]	55*	55*
Zelldruck σ_3 [% von σ_1]	50	70
Frequenz f [Hz]	1...90**	1...90**

Vorversuche ergaben, dass nur im Bereich von 1 bis 10 Hz eine gute Ausführung seitens der Triaxialanlage durchführbar ist und ab 15 Hz eine manuelle Nachsteuerung der Auflast aus dynamischen und statischen Anteil notwendig wird, damit Sollwerte erzielt werden. Fehlerursachen dafür können in zu langsamer Datenerfassung und zu starkem Setzungsverhalten, aufgrund von Feinkörnigkeit, Sandanteil im Auelehm, Porenräumen und Luft einschlüssen liegen. Eine schnelle Datenerfassung ist unabdingbar.

Je Boden wurden vier Probekörper unter den Frequenzen 1 Hz für Zyklisch, 15 Hz für Dynamik, 30 Hz für den Arbeitsbereich häufig verwendeter Verdichtungsgeräte und 60 Hz für den Grenzbereich der Prüfmaschine getestet. Eine Konsolidationsphase fand nicht statt. Zell- und Axialdruck wurden, wie in Anhang C ersichtlich ist, mit einer Einbautiefe von 1 m gewählt und entsprechen somit auch dem Mittelwert der Folgeversuche. Eine dynamische Last konnte aus dem Datenblatt einer Rüttelplatte der Firma Bomag ermittelt werden.¹⁹ Die Versuchssteuerung erfolgte mit dem Programm GeoDESC als manueller Versuch ohne Steuerung und dazugehörige Protokolle dazu befinden sich in Anhang C.

Die manuelle Nachsteuerung der *force amplitude* geschah in kleinen Schritten vom errechneten Ausgangswert 0,108 kN, um den Boden nicht einer Last auszusetzen, die größer ist als die angedachte Einwirkung. Somit ist gewährleistet, dass beispielsweise ein Verdichtungsgerät heranfährt und einige Sekunden vergehen, bis es sich direkt über dem Bodenabschnitt befindet

¹⁸ 60 Hz entspricht Grenze für Sauberkeit der Ergebnisse nach Hersteller und 90 Hz Leistungsgrenze der Maschine.

¹⁹ Anhang F.1: Datenblatt der Rüttelplatte und Berechnung im Anhang C.1 Versuchsschema.

und der volle Lasteintrag mit voller Amplitude vollzogen wird. In den Folgeversuchen ist dadurch die Größe der Nachsteuerung bekannt und diese Ungenauigkeit von Anfang an beseitigt.

6.4 Zyklische CU-Triaxialversuche

Für die zweite Phase zur Untersuchung der Verdichtungsarbeit einer Rüttelplatte auf TL und SE in verschiedenen Einbautiefen wurde eine Konsolidationsphase von zwei Stunden gewählt. Hintergrund dafür ist die Simulation eines bereits zwei Stunden zuvor erfolgten Einbaus des Bodens. Axiale und radiale Lastkomponente infolge der Einbautiefen von 0,5 bis 2,5 Meter wurden beaufschlagt. Der Versuch ging undränert vonstatten, aufgrund der Teilsättigung und technischen Ausrüstung der Anlage. Infolge der vorangegangenen Experimente zur Anregungsfrequenz wurde die Frequenz 60 Hz gewählt, was ersichtlich ist aus dem Kapitel 7.1.2 zur Auswertung dieser ersten Versuchsreihe. Während der Konsolidation wurde die Abtastrate der Aufzeichnungen auf 30 Sekunden gehalten und ab dem dynamischen Lasteintrag auf eine Sekunde, bzw. 250 Hz, erhöht. Dies geschah um einerseits die Datenmenge gering zu halten und somit die Auslesezeit zu verkürzen und andererseits die bedeutsamen ersten zehn Minuten ab dynamischen Lasteintrag genauer aufzuzeichnen. Hiermit wird das Wirtschaftlichkeitskriterium im Blick auf die Verdichtungsarbeit der Rüttelplatte erfasst.

Tabelle 7: Phase 2 Variation der Last- und Umlagerungsspannungen: Eingangparameter im Versuchsschema.

	B1 TL	B2 TL	B3 TL	B4 SE	B5 SE	B6 SE
Axialdruck σ_1 [kN/m ²]	10	20	50	10	20	50
dyn. Auflast σ_d [kN/m ²]	55	55	55	55	55	55
Zelldruck σ_3 [% von σ_1]	80	50	30	90	70	50
Frequenz f [Hz]	60	60	60	60	60	60

Tabelle 8: Phase 2 Variation der Last- und Umlagerungsspannungen: manuelle Nachsteuerung.

	Tiefe [m]	σ_3 [kN/m ²]	<i>force</i>	<i>force amplitude</i>	<i>force amplitude</i>	
			σ_1	σ_d	$(\sigma_1 + \sigma_d)_{\text{soll}}$	$\sigma_{d,\text{neu}}$
TL	0,5	8	0,0196	0,108	0,1276	0,215
	1,0	10	0,0393	0,108	0,1473	0,215
	2,5	15	0,0983	0,108	0,2063	0,21
SE	0,5	9	0,0196	0,108	0,1276	0,21
	1,0	14	0,0393	0,108	0,1473	0,215
	2,5	25	0,0983	0,108	0,2063	0,21

Tabellen 7 und 8 führen die Eingabeparameter genauer auf. Die zweite Phase der Betrachtung zur Variation von Last- und Umlagerungsspannung wurde analog zu den Versuchen der Anregungsfrequenz durchgeführt und ausgewertet. Demzufolge befinden sich in Anhang C die

Protokolle zu Vorbereitung des Versuchsstandes, Durchführung und grafischer Auswertung und im Anhang D.1 nur das Versuchsschema. Die Auslesung der SD-Exportdateien hatte einen großen Einfluss auf die Durchführung dieser Phase, da hierfür teilweise drei bis acht Stunden pro Versuch notwendig waren. Zur Validierung der Ergebnisse aus den Versuchen zur Anregungsfrequenz wurden die zwei Versuche in 1,0 Metern Tiefe während dieser Phase wiederholt und mit einer Konsolidationsphase berücksichtigt.

6.5 Simulation Walzenüberfahrt

Um die Überfahrt einer Walze mit Hilfe der Triaxialanlage zu simulieren wurde der Auelehm TL als zu untersuchender Boden gewählt, da jener in Vorversuchen bereits gute Prüfeigenschaften aufwies. Gleichzeitig erfolgte die Auswahl einer für den Erdbau spezifischen mittelgroßen Walze: BOMAG BW 211 D-5²⁰. Die Durchführung hatte drei Schritte: Festlegung der manuellen Nachsteuerung anhand eines Kunststoffkörpers, Phase 1 (Simulation Start der Walze) und Phase 2 (fünf Überfahrten).²¹

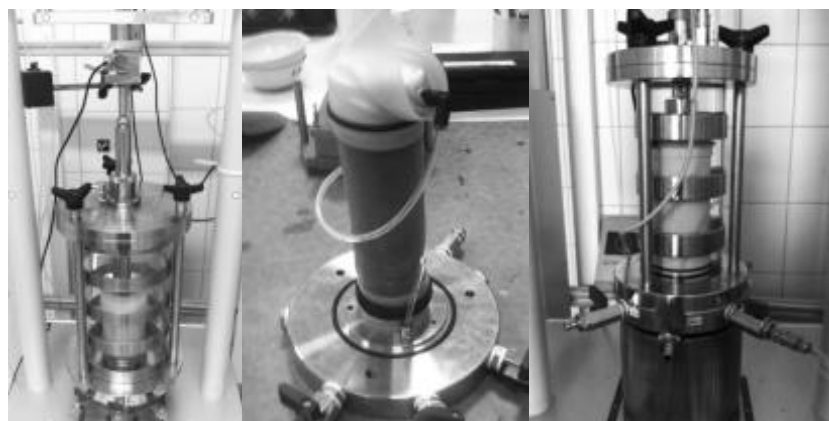


Abbildung 6: Kunststoffkörper in der Druckzelle, TL: Einbau in 50er Druckzelle, 50er Druckzelle in der Prüfpresse.

In Vorversuchen zur Nachsteuerung der Lastamplitude, die hier genauso notwendig waren wie bei den vorangegangenen Tests an SE und TL im Vergleich, musste festgestellt werden, dass eine 100-prozentige Überfahrt bei 30 Hz nicht realisierbar war. Wie aus Tabelle 9 ersichtlich ist, konnte die manuelle Nachsteuerung bis 60% von dynamischer und statischer Lastzugabe vollzogen werden, da 1 kN die Grenze der Prüfmaschine für die Kraftamplitude ist. Somit wurde ein 50%iger Eintrag von dynamischer und statischer Last der Walze für Phase 2 festgelegt (Abbildung 7).

²⁰ Relevante Spezifikationen der Walze gemäß Anhang F.2 Walze: Zentrifugalkraft 158 kN, $W = 2130$ mm, Annahme: Walze gräbt sich auf 20 cm Breite ein ($A=2,13 \times 0,2$ m), statische Linienlast 26,6 kg/cm, Frequenz 30 Hz.

²¹ Anhang E: Versuchsschema und Durchführung der Walzensimulation.

Tabelle 9: Simulation der Walzenüberfahrt: Ergebnisse aus manueller Nachsteuerung.

%	F_1 [kN]	F_d [kN]	F_1+F_d [kN]	$F_{d,neu}$ [kN]
10	0,0419	0,0728	0,1147	0,14
20	0,0445	0,1456	0,1901	0,285-0,291
30	0,0471	0,2184	0,2655	0,425
40	0,0497	0,2912	0,3410	0,545-0,570
50	0,0523	0,3640	0,4230	0,70
60	0,0549	0,4368	0,4917	0,82
80	0,0601	0,5824	0,6425	-
100	0,0653	0,7280	0,7933	-

In Phase 1 konnte der konsolidierte Probekörper mit einer fünfminütigen Pause jeweils für 30 Sekunden mit 40 % des Eintrags der Walze untersucht werden. Eingabeparameter dazu finden sich in Tabelle 10 und Herleitungen entsprechend wieder im Anhang E.

Tabelle 10: Phase 1 Simulation Walzenüberfahrt: Eingabeparameter bei 40% dynamischer und statischer Walzenlast.

	Zeit [min]	σ_3 [kN/m ²]	F_1 [kN]	F_{1Walze} [kN]	ΣF_1	F_d [kN]
Konsolidation	120	10	0,0393	-	0,0393	-
Start Walze	0,5	10	0,0393	0,026	0,0497	0,545
Pause	5	10	0,0393	-	0,0393	-
Start Walze	0,5	10	0,0393	0,026	0,0497	0,545
Pause	5	10	0,0393	-	0,0393	-
Start Walze	0,5	10	0,0393	0,026	0,0497	0,545
Endzyklus	5	10	0,0393	-	0,0393	-

Für Phase 2 konnte die Versuchssteuerung soweit angepasst werden, dass ein Eintrag von dynamischer und statischer Last der Walze, zusätzlich zur Simulation eines Einbaus des Bodens in 1 m Tiefe nach einer Liegezeit von zwei Stunden (Konsolidationszeit zwei Stunden) in den jeweiligen prozentualen Schritten im Zeitraum von je drei Sekunden erfolgte. Dieser 27-sekündige, stufenartige Eintrag von Eigenlast und dynamischer Verdichtung der Walze mit jeweils fünfminütigen Pausen ist in Anhang E genauer aufgeführt.

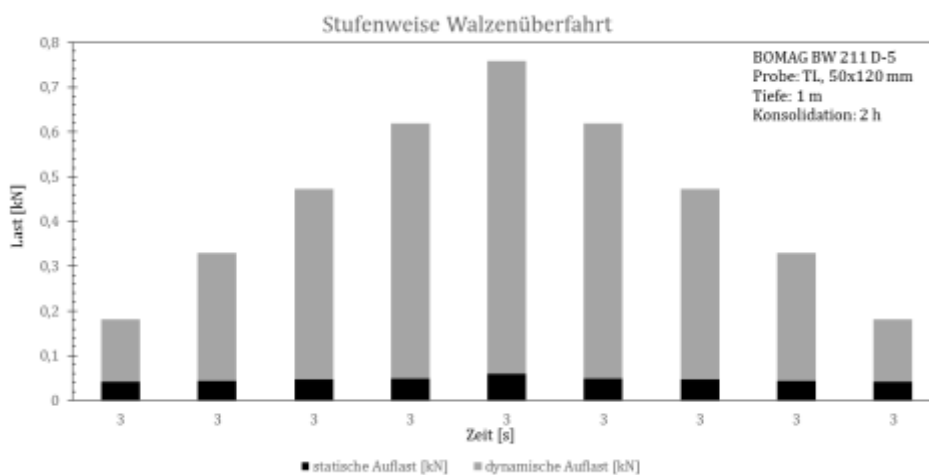


Abbildung 7: Phase 2 Simulation Walzenüberfahrt: Schema für 50%ige statische und dynamische Walzenlast.

7 Bewertung der Versuche

7.1 Diskussion der Versuchsergebnisse

7.1.1 K0- und Oedometerversuch

Abbildung 8 kombiniert den grafischen Verlauf des Setzungsverhaltens von TL während Oedometer- und K0-Versuch. Wie in Kapitel 5.3 erläutert wurde ergibt sich der zeitliche Versatz der Kurven aus den unterschiedlichen Laufzeiten. Bei einaxialen Kompressionsversuchen ist es steuerungstechnisch ratsam eine verlängerte Laststufe zu definieren, sodass der gewollte Stundenwert tatsächlich datentechnisch registrieren wird. Die Triaxialanlage ermöglicht hingegen eine höhere Aufzeichnungsrate von Daten, was diese Vorgehensweise nicht erfordert. Die niedrig gewählten Auflasten sind für den gleichmäßigen Setzungsverlauf des Oedometerversuches verantwortlich. Es hätten größere Belastungsphasen gewählt werden können, damit der hier vorliegende Auehlm an den Grenzzustand geführt wird. Beide Geräte sind im Stande größere Lasten einzutragen. Im Gegensatz dazu weist die Setzungskurve des K0-Versuches in erster und zweiter Laststufe ein viel geringeres Setzungsverhalten auf, welches aber im Verhältnis zur Setzung des Oedometerversuches steht. Ursache dafür liegt in der gewählten Poisson-Zahl von 0,35. Empfehlenswert wäre an dieser Stelle eine Kalibrierung in der Form, dass eine Variation dieses Wertes erfolgt, um den Setzungsverlauf der Triaxialanlage auf das Niveau des Oedometers anzugleichen.

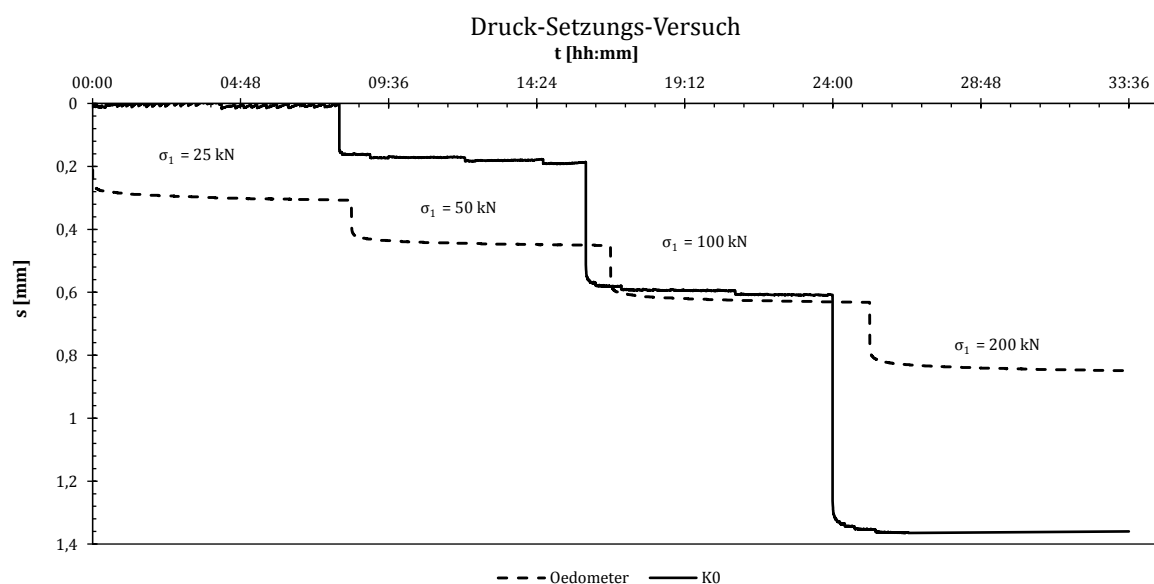


Abbildung 8: Setzungsverläufe von einaxialen Kompressionsversuch und K0-Versuch mit Querdehnung.

Während der dritten Laststufe glichen sich die Setzungsverläufe an und in der vierten Phase begann eine erneute stärkere Setzung im K0-Versuch, wie im der vorangegangenen Übergang von Phase zwei zu drei. Bei einer gewählten Poisson-Zahl von 0,35 war die Setzung stärker bei höherer Last und niedriger bei geringerer Last im Vergleich zum Oedometerversuch. Dies kann

seine Ursachen in unterschiedlicher Probengröße haben, da Probekörper geringerer Höhe eine bessere Verteilung der Spannungen über den Querschnitt gewährleisten. Weiterhin ist eine Validierung der Ergebnisse anhand einer Probebelastung als Feldversuch möglich.

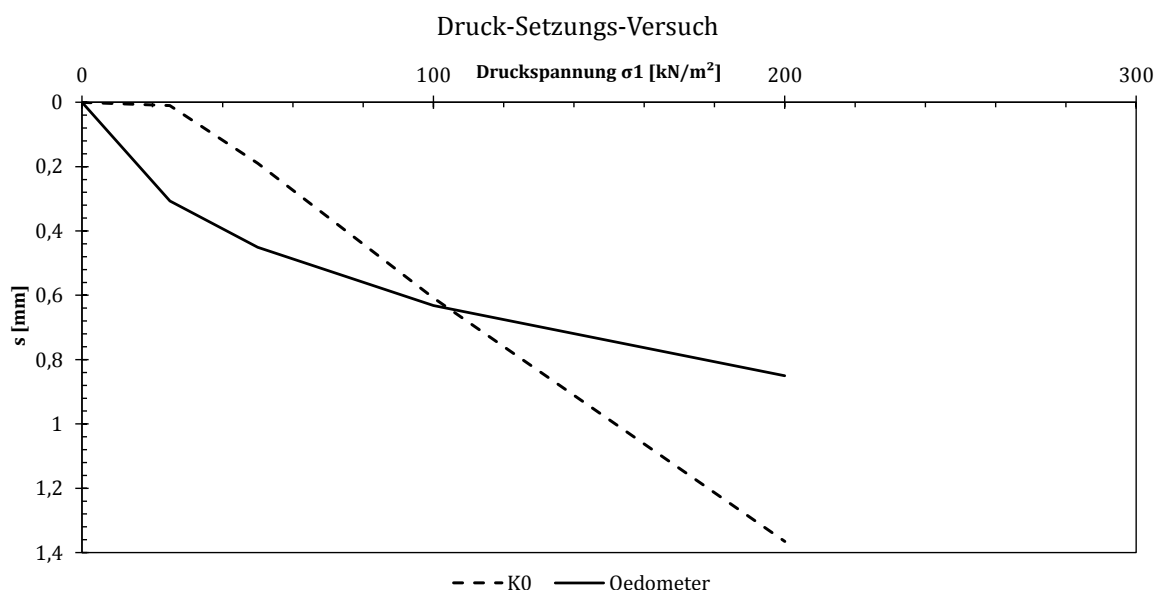


Abbildung 9: Last-Setzungsverläufe von einaxialen Kompressionsversuch und K0-Versuch mit Querdehnung.

Eine weitere Darstellung des Versuchs im Last-Setzungsverlauf (Abbildung 9), zeigt den Schnittpunkt der Setzungen innerhalb der dritten Laststufe auf und illustriert noch einmal vorangegangene Ausführungen. Während Abbildung 8 eine Qualitätsbeurteilung zulässt wird Abbildung 9 üblicherweise für Analysen des Steifemoduls E_s genutzt, die in Tabelle 11 zusammengefasst sind.

Tabelle 11: Laststufen und Steifemodule aus K0- und Oedometerversuch.

		Oedometer				K0-Versuch			
σ_1	kN/m ²	25	50	100	200	25	50	100	200
s_{max}	mm	0,307	0,451	0,632	0,850	0,01	0,19	0,608	1,365
E_s	MN/m ²	1,62	3,46	5,50	9,13	49,78	2,77	2,38	2,63

Die Primärsetzungen innerhalb der einzelnen Laststufen waren nach spätestens 15 Minuten, sowohl beim einaxialen Kompressionsversuch, als auch beim K0-Versuch mit Querdehnung, erreicht. Beim Oedometerversuch erfolgt eine plane Lasteintragung durch einen breiten Stempel, hingegen bei der triaxialen Druckzelle ist dies nicht der Fall. Hier wird ein Stempel vom Durchmesser 3 cm verwendet, was wiederum in die ungleichmäßige Setzung bei dritter und vierter Laststufe resultiert haben könnte und in der Kombination mit der Nichtbeachtung der Kolbenstangenkorrektur bei der Programmierung unsaubere Ergebnisse lieferte. Tabelle 12 verdeutlicht, welcher Belastung die Probe tatsächlich ausgesetzt war.

Tabelle 12: K0-Versuch: tatsächlicher axialer Lasteintrag infolge Zelldruck und Axialdruck.

Stufe	σ_1 [kN/m ²]	σ_3 [kN/m ²]	$\sigma_1 \cdot A_{100}$ [kN]	$\sigma_1 \cdot A_{100-30}$ [kN]	Σ_i [kN]	$\sigma_{1,neu} = \Sigma_i / A_{100}$ [kN]
1	25	13,46	0,196	0,096	0,292	37,18
2	50	26,92	0,393	0,192	0,585	74,48
3	100	53,92	0,785	0,385	1,170	148,97
4	200	107,69	1,571	0,770	2,341	298,07

Demzufolge betragen die axialen Einwirkungen circa 150% vom Vorgabewert, weil die Kolbenstangengeometrie vernachlässigt wurde.

7.1.2 Anregungsfrequenz

Zur Auswertung und Festlegung einer Anregungsfrequenz für Folgeversuche wurden die grafischen Daten zum Setzungsverhalten bei vier verschiedenen Frequenzen je untersuchten Boden herangezogen.

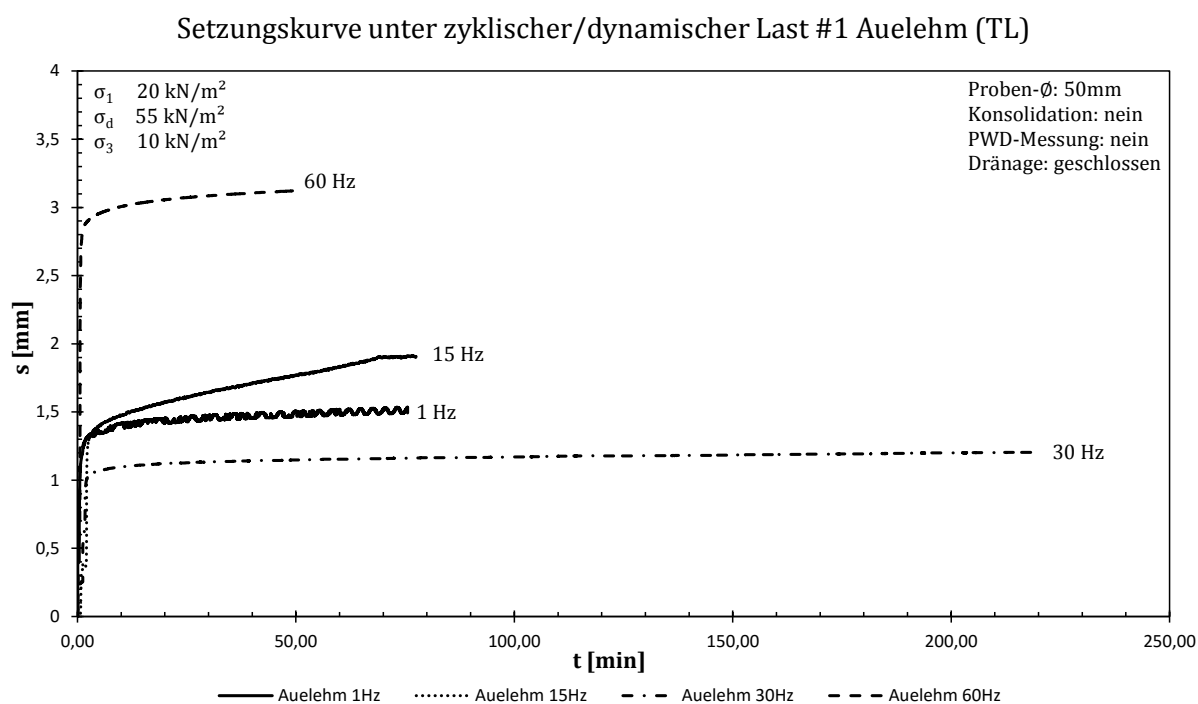


Abbildung 10: Setzungen von Auelehm (TL) bei verschiedenen Frequenzen.

Die Versuche wurden durchgeführt bis sich ein Setzungsplateau einstellte und dadurch keine weiteren Veränderungen mehr zu erwarten waren. Bei 30 Hz, also der Hälfte der Grenzfrequenz der Triaxialanlage, zeigt sich ein ungewöhnliches Setzungsbild, welches wahrscheinlich auf eine Resonanzerscheinung zurückzuführen ist. Der Anlagenresonanzpunkt liegt bei 16 bis 30 Hz und in Folge gerieten Körner und Maschine möglicherweise in Resonanz, was eine schnelle

Verdichtung zur Folge hatte. Eventuell deutet dies auch auf einen Resonanzbereich der TL-Probe, also des Auelehms selbst, hin.

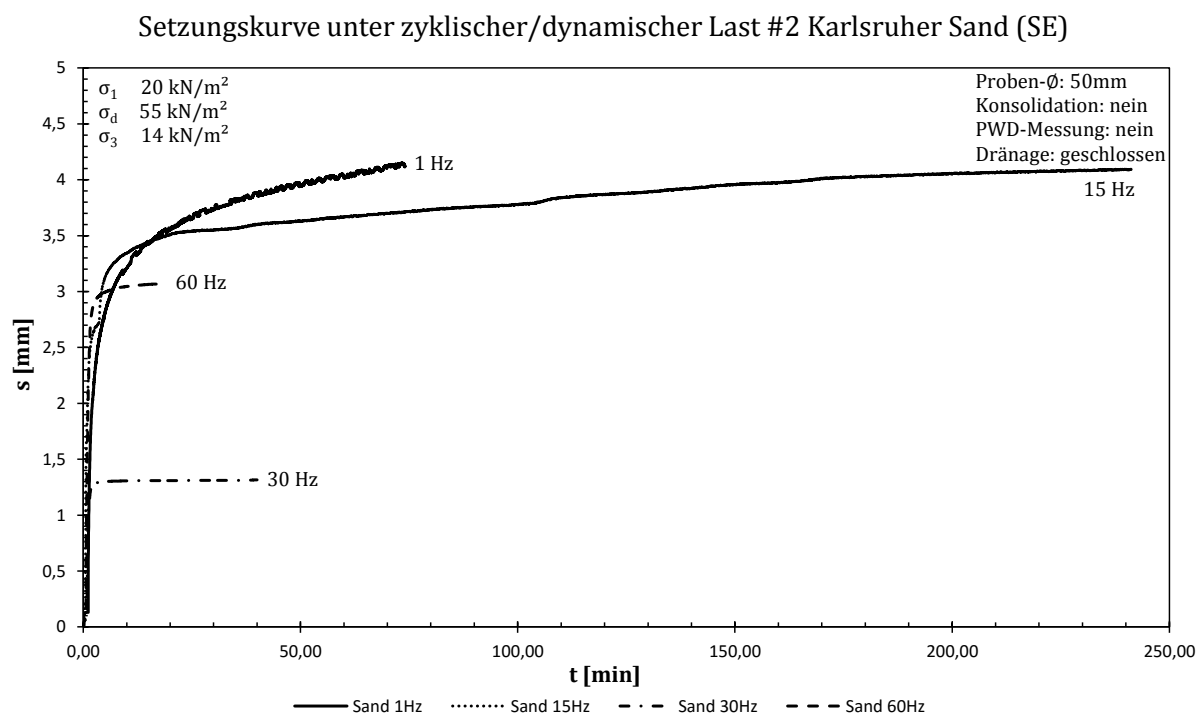


Abbildung 11: Setzungen von Karlsruher Sand (SE) bei verschiedenen Frequenzen.

Zusammengefasst finden sich die Daten aus dem Setzungsverhalten von SE und TL in Tabelle 13. Weiterhin lässt sich aus dem Verlauf der Graphen entnehmen, dass für hochfrequente Bereiche das erste Zeitfenster von circa zehn Minuten mit einer zügigen Initialsetzung bedeutsam ist, um zu beurteilen, ab welchem Zeitpunkt die Arbeit mit einer Verdichtungsmaschine irrelevant wird und nicht mehr notwendig oder effektiv ist. Im Gegensatz dazu ist bei niedrigeren Frequenzen, wie 1 und 15 Hz, der Verlauf des Setzungsplateaus für die Beobachtung von Setzungen bereits unter minimalen Frequenzen signifikant.

Tabelle 13: Phase 1 Anregungsfrequenz: Setzungen und Frequenzen.

	Auelehm (TL)				Karlsruher Sand (SE)			
Frequenz (Hz)	1	15	30	60	1	15	30	60
Zeit bis Plateau (h)	1	1	3	0,7	3,4	1,2	0,7	0,3
Setzung (mm)	1,5	1,9	1,2	3,1	4,2	4,2	1,3	3

Eine Überprüfung der Setzung durch die vorgegebene statische Last ergab, wie im Balkendiagramm Abbildung 12 ersichtlich, dass der Anteil der Verdichtung infolge dieser, bei TL circa 0,4 bis 0,6 mm und bei SE 0,1 bis 0,2 mm, betrug. Da der Betrag der Setzung unter dynamischer Belastung bei SE über 95 % aufweist, ist hier von einer einheitlichen Ausgangssituation auszugehen. Bei TL befindet sich der Setzungsanteil der statischen Last bei 15

bis 28 % und ist somit nicht als uniforme Ausgangssituation zu bewerten. Demzufolge hatten die TL-Probekörper einen unterschiedlichen Ausgangszustand für die zyklische und dynamische Belastung und diese Randbedingung gilt als nicht erfüllt und Fehlerursache für unsaubere Ergebnisse.

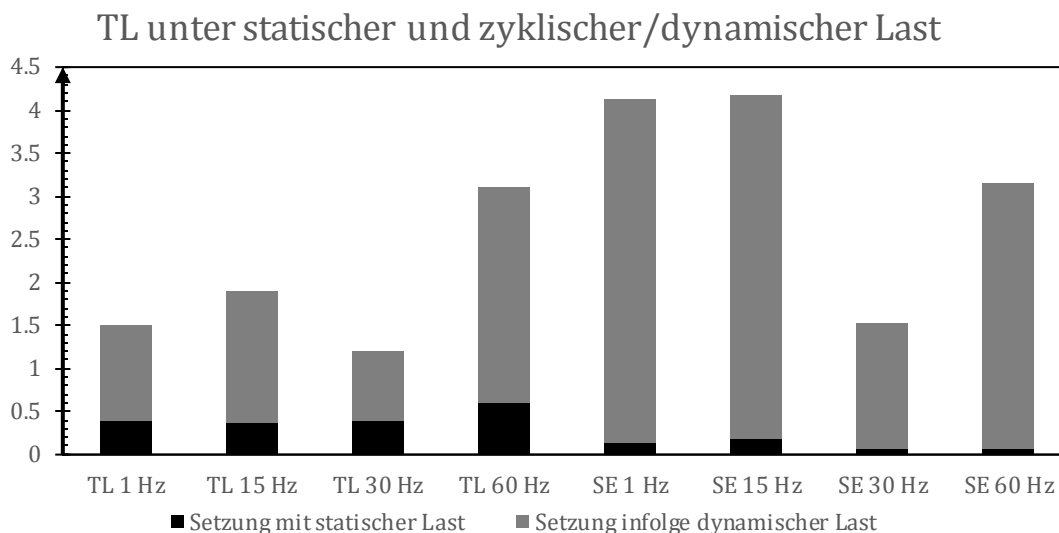


Abbildung 12: Statische und zyklisch/dynamische Setzung s [mm] von TL und SE.

Als zweite Randbedingung gilt, dass die Verdichtung als beendet angesehen wurde, wenn die Setzung innerhalb von zehn Minuten geringer als 0,01 mm blieb. Dies wurde als Abbruchkriterium des Versuches und Identifikationsmerkmal der Plateauphase deklariert. Zusätzlich konnten während dieser Experimentphase erste Erfahrungen zur manuellen Nachsteuerung gesammelt werden, die essentiell für den Folgeversuch zur Untersuchung zweier Böden in verschiedenen Einbautiefen sind. Tabelle 14 führt die notwendige Anpassung des Parameters *force amplitude* auf.

Tabelle 14: Manuelle Nachsteuerung verschiedener Frequenzen.

Frequenz [Hz]	1	15	30	60
Force (Soll) [kN]	0,147	0,147	0,147	0,147
force amplitude (errechnet) ²² [kN]	0,108	0,108	0,108	0,108
force amplitude (angepasst) [kN]	-	0,168	0,215	0,215

Mit diesen Versuchsergebnissen wurde die Frequenz 60 Hz für die Folgeversuche festgelegt. 60 Hz korreliert mit 55 kN/m² als dynamische Last von Verdichtungsgeräten, welche einen Arbeitsbereich von 30 bis 60 Hz und höher innehaben. Sowohl TL, als auch SE, zeigten bei der gewählten Frequenz ein gutes Setzungsbild und die manuelle Anpassung war bekannt.

²² $force\ amplitude = A \cdot \sigma_d = (0,05\ m)^2 \cdot \pi / 4 \cdot 55\ kN/m^2 = 0,108\ kN.$

Anlagentechnisch ist diese Auswahl weiterhin interessant, weil es sich um die Grenze des Arbeitsbereichs des Triaxialprüfstandes handelt.

7.1.3 Variation von Last- und Umlagerungsspannung

In Zeit-Setzungsdiagrammen (Abbildungen 14 und 15) ist ersichtlich, dass die Setzung infolge Konsolidationsspannung bereits nach fünf bis zehn Minuten abgeschlossen war. Für Folgeversuche kann hier also eine geringere Konsolidationszeit als zwei Stunden für SE, sowie TL, gewählt werden. Je tiefer der Einbau erfolgte desto höher war die Setzung innerhalb dieses Abschnittes. Die 10-Minuten-Fenster verdeutlichen den Abschluss der Primärsetzung infolge dynamischer Belastung nach bereits weniger als sechs Minuten. Genau wie in den Versuchen zur Anregungsfrequenz, stellten sich in einem Meter Tiefe wieder 3 bis 3,1 mm Setzung ein.

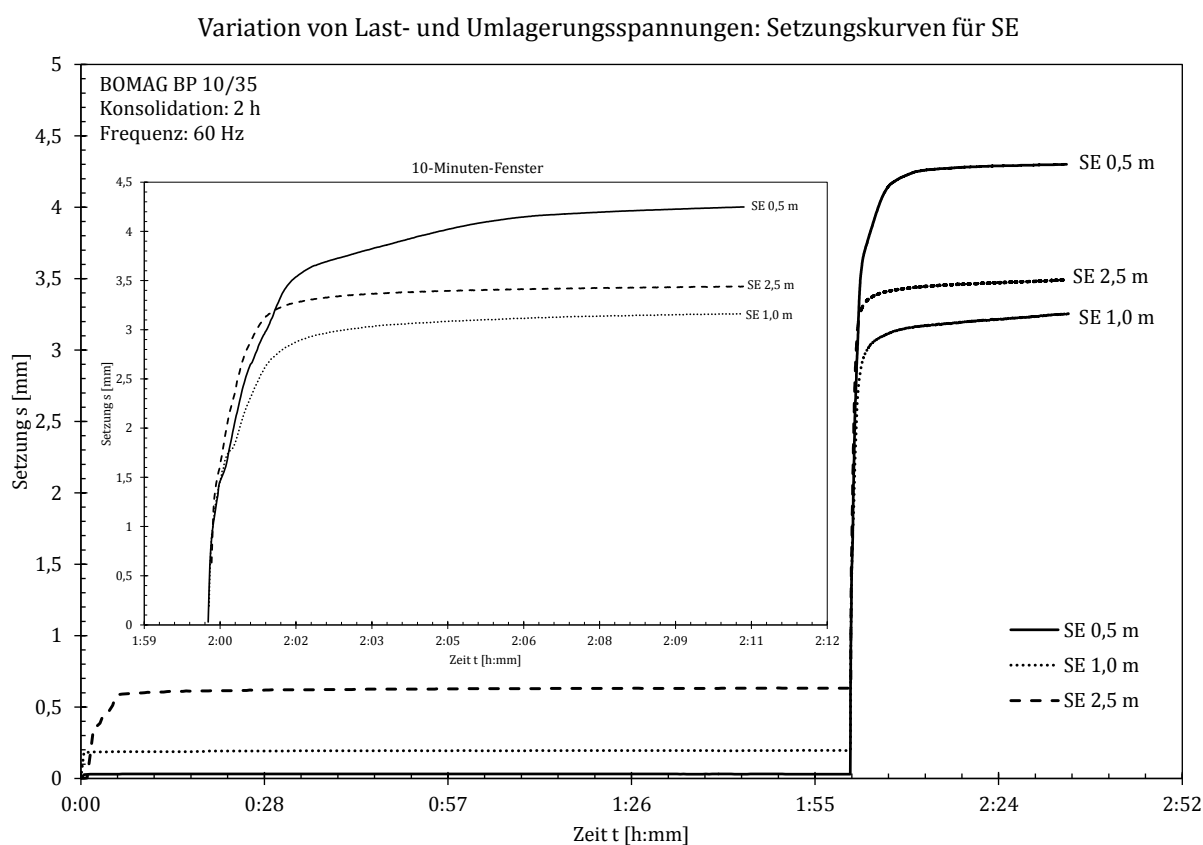


Abbildung 13: Setzungskurven für SE mit 10-Minuten-Fenster.

In allen Versuchen wurde die dynamische Belastung 34 Minuten durchgeführt und somit eine Gesamtlaufzeit von 02:34 Stunden für jeden Versuch erzielt. Die 34 Minuten waren relevant für eine spätere genaue Analyse des SD-Exportes in Bezug auf das Last-Setzungsverhalten. Vor allem bei SE ist ersichtlich, dass das Setzungsverhalten infolge dynamischer Last mit der Einbautiefe des Probekörpers abnimmt. Da Rüttelplatten nur eine Tiefenwirkung bis circa 0,4 m haben, kommt in den unteren Bereichen kaum noch eine Einwirkung an. Demzufolge wäre es

sinnvoller gewesen die Betrachtung in Fünf-Zentimeter-Schritten ab Oberkante Einbaugrenze bis zu einer Tiefe von circa 50 cm durchzuführen.

Tabelle 15: Darstellung des prozentualen Anteils der dynamischen Verdichtung von TL und SE in verschiedenen Tiefen.

Material	Tiefe [m]	s_{stat} [mm]	s_{dyn} [mm]	Σs [mm]	$s_{\text{dyn}} / \Sigma s$ [%]
TL	0,5	0,42	2,20	2,62	84
	1,0	0,77	2,35	3,12	75
	2,5	2,27	2,21	4,48	49
SE	0,5	0,03	4,27	4,30	99
	1,0	0,19	3,06	3,25	94
	2,5	0,63	2,86	3,49	82

Anhand von Tabelle 15 wird die Abnahme der Verdichtungswirkung bei zunehmender Einbautiefe illustriert. Setzungsanteile zugehörig zur statischen und dynamischen Belastung werden aufgelistet und der prozentuale Anteil der Setzung infolge des dynamischen Lasteintrags am Gesamtanteil aufgeführt. TL weist eine stärkere Abnahme der Verdichtungswirkung als SE auf. SE weist ein schlechteres Verdichtungsverhalten als TL auf.²³

Variation von Last- und Umlagerungsspannungen: Setzungskurven für TL

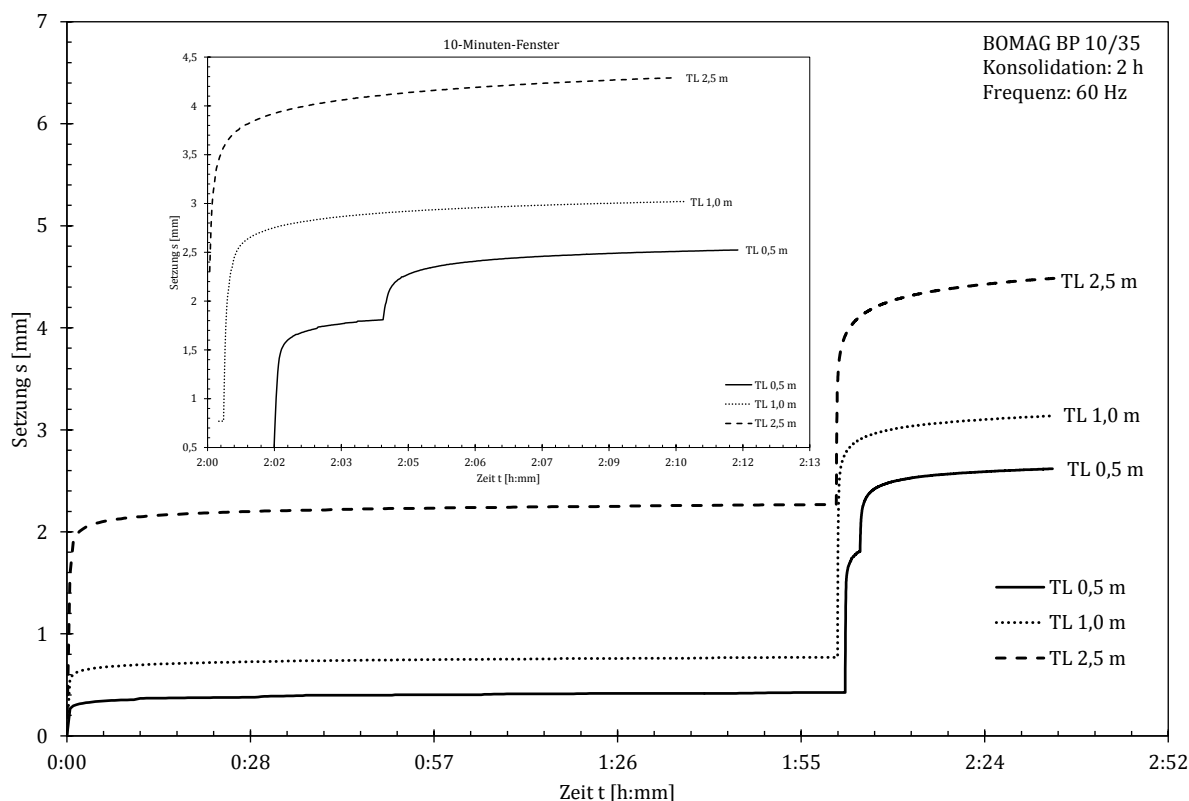


Abbildung 14: Setzungskurven für TL mit 10-Minuten-Fenster.

²³ Aufgeführter Sachverhalt wird an der Vielzahl von Proctorkurven für Karlsruher Sand in Anhang A.3 ebenfalls ersichtlich.

7.1.4 Walzenüberfahrt

Phase 1 als Startsimulation einer Walze hatte den Hintergrund der Erprobung der Systemsteuerung und sollte eine Grundlage für Phase 2 hinsichtlich der gewählten Eingabeparameter bieten. Da die gewählten Parameter zu guten Datenergebnissen führten konnte Phase 2 problemlos durchgeführt werden.

Tabelle 16: Phase 1 Simulation Walzenüberfahrt: statische und dynamische Verdichtung des Walzenstarts.

Start	s_{ei} [mm]	s_{pl} [mm]	$s_{pl}/3,8\text{mm}$ [%]
1	0,5	3,25	85,5
2	0,5	0,35	9,21
3	0,5	0,20	5,26

$s_{stat,end} = 3,8 \text{ mm}$

Im Setzungsbild der Phase 1 ist ersichtlich, dass die initiale plastische Setzung infolge des ersten Starts der Walze mit 3,25 mm den größten Anteil einnahm, wie Tabelle 16 aufführt. Die darauffolgenden zwei plastischen Setzungen nahmen nur 9,21% und 5,26% Anteil an der Gesamtverdichtung der drei Walzenstarts mit 3,8 mm. Wäre dieser Vorgang weiter fortgesetzt worden, ist davon auszugehen, dass diese Anteile noch stärker sinken und somit ein einzelner 30-sekündiger Übergang ausgereicht hätte. Während der drei Simulationen hatte die Verdichtungsarbeit jeweils einen Ausschlag von 0,5 mm, wobei noch genauer untersucht werden müsste, ab wann auch dieser Anteil abnimmt.

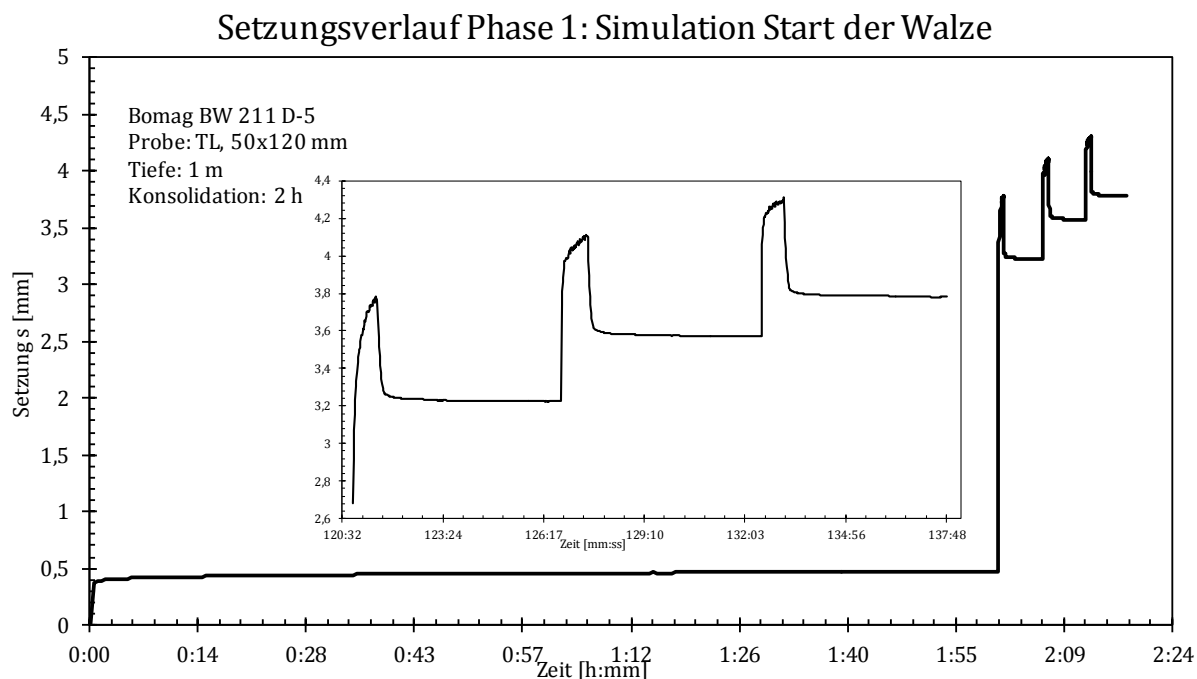


Abbildung 15: Setzungsverhalten von TL bei drei Starts der Walze mit vergrößerter Darstellung der dynamischen Belastungs- und statischen Ruhephase.

Im Lastverlauf der Phase 1 ist im vergrößerten 15-Minuten-Fenster zur genaueren Darstellung der dynamischen Belastungsphase deutlich erkennbar, welche Anteile statische und dynamische Lastkomponente innehaben. Die 30-sekündigen Peaks alle fünf Minuten weisen eine starke Diskrepanz zu den Eingabedaten auf. Dies ist zu begründen mit der manuellen Nachsteuerung, die in diesem Fall notwendig war. Der Sollwert der statischen Verdichtung beträgt 0,0497 kN und ist im Diagramm mit 0,25 kN vertreten, wobei im dynamischen Bereich ein Unterschied von 0,545 kN zu 0,04 kN als Ist-Wert vorhanden ist. Insgesamt ist der Eintrag der gewollten Kraft jedoch erfolgt, da die dynamische Kraft mit 0,545 kN nachgesteuert wurde, wobei der errechnete Wert mit 0,2912 kN für 40%igen Lasteintrag der dynamischen Last der Walze darunterliegt, aber mit 0,0497 kN statischer Last aus 40%iger Auflast der Walze und 100%igem Konsolidationsdruck (0,0393 kN) in der Summe 0,33 kN ergeben, welche in jeder der drei Starts erreicht wurde (Abbildung 17).

Wie Abbildungen 16 und 19 zeigen, stellte sich das Setzungsplateau der Konsolidationsphase bereits nach circa zehn Minuten bei 0,5 mm ein und somit kann in Zukunft bei vergleichenden Untersuchungen ebenfalls eine verkürzte Konsolidationszeit für TL gewählt werden.

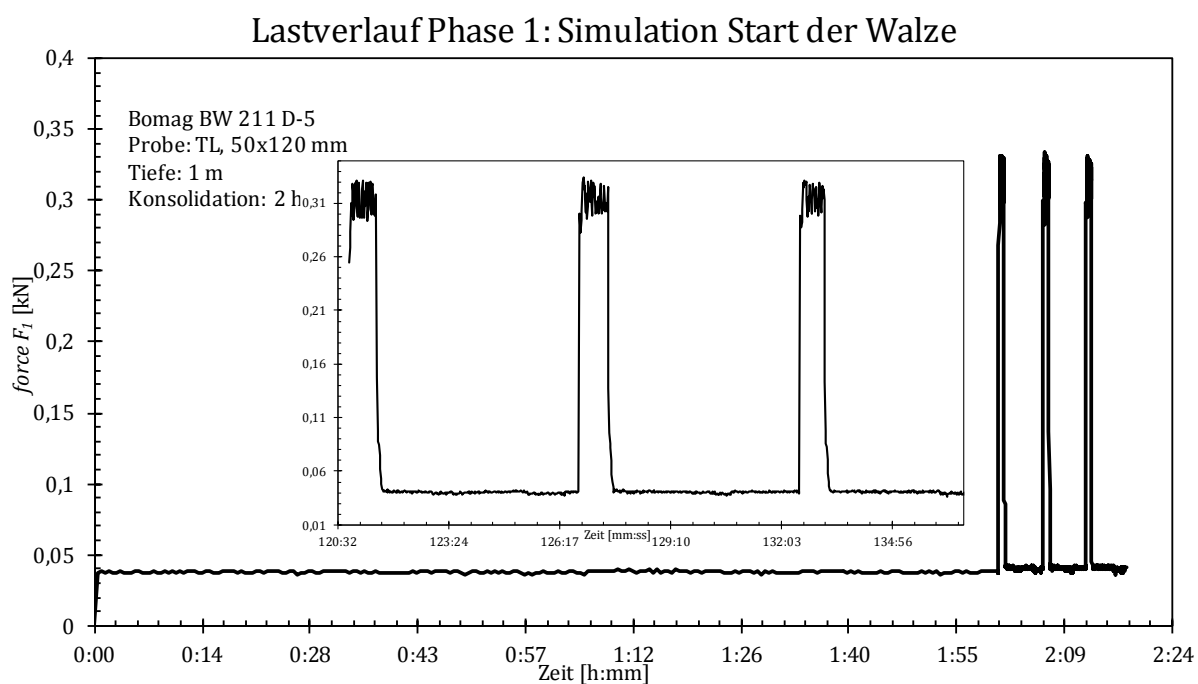


Abbildung 16: 40%iger Lasteintrag auf TL bei drei Starts der Walze mit vergrößerter Darstellung der dynamischen Belastungs- und statischen Ruhephase.

Für Phase 2 der Simulation wurden Last- und Setzungsverhalten in einem Diagramm (Abbildung 19) über die Zeit dargestellt. Kritisch ist, dass kein gleichmäßiger Übergang, sondern steuerungstechnisch lediglich eine etappenweise Überfahrt und auch nur unter 50%igem dynamischen und statischen Lasteintrag der Walze erfolgen konnte.²⁴ Dieser diskrete

²⁴ Abbildung 7 zeigt diesen Sachverhalt grafisch im 27-Sekunden-Fenster auf.

Lastauftrag ist im plastisch-elastischen Setzungsbild in Abbildung 19 schwer erkennbar. Im Gegensatz zu Phase 1 wurde hier die Kombination aus statischer und dynamischer Last der Walze allein in der ersten Überfahrt vollständig erreicht. Dies hat den Hintergrund, dass der Auelehm, wie Abbildung 19 verdeutlicht, während der ersten Überfahrten seine Grenzlast erreicht hat und abgeschert wurde. Abbildung 18 visualisiert diesen Prozess.



Abbildung 17: Abgescherte TL-Probe aus Phase 2 Simulation Walzenüberfahrt.

Last-Setzungsverlauf der Walzenüberfahrt Phase 2

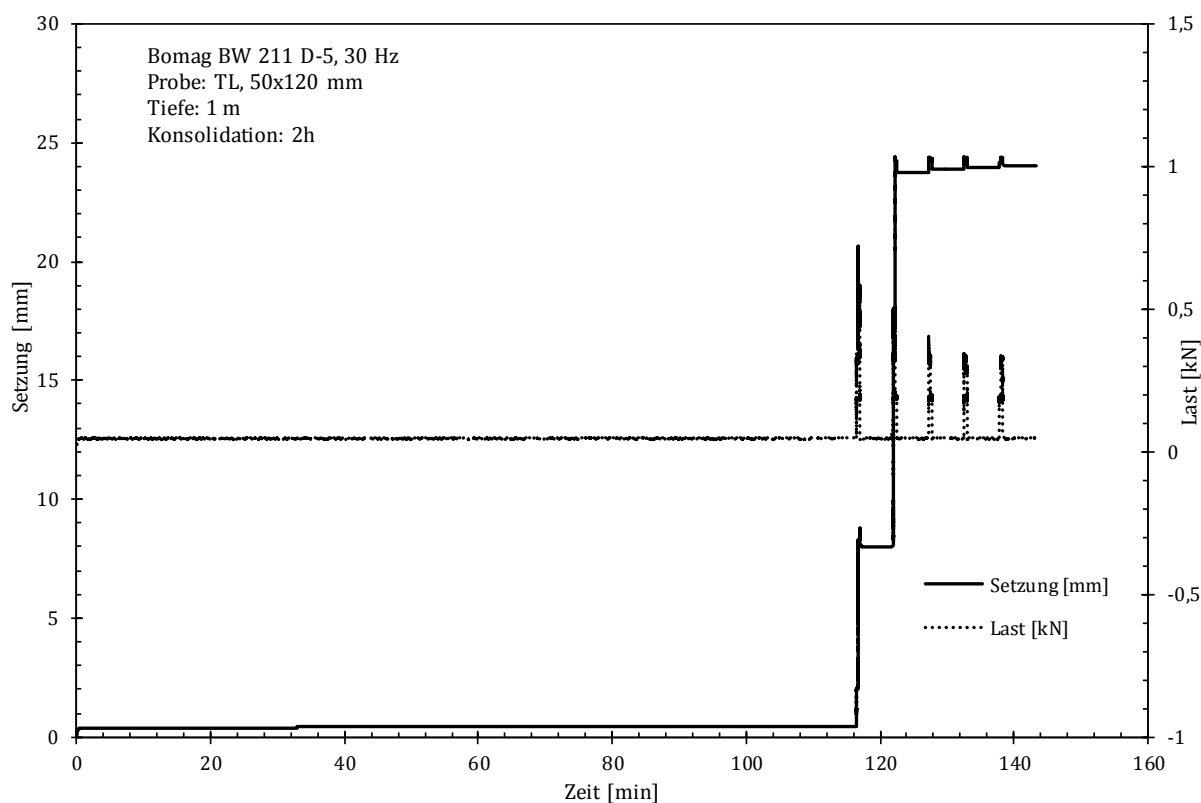


Abbildung 18: Phase 2 Simulation Walzenüberfahrt: Grafische Darstellung von Belastung und Setzungsverhalten.

Mit einer plastischen Setzung von circa 7,7 mm nach der ersten Überfahrt, was 6,4 % der Probenhöhe ausmacht und weiteren Setzungen infolge der zweiten bis fünften Überfahrt von 24 bis 24,5 mm, abzüglich Konsolidationssetzung von ungefähr 0,4 mm, also 20 % bereits nach der

zweiten Überfahrt, wurde nicht nur das Abbruchkriterium für Triaxialversuche nach DIN 18137 erreicht, sondern auch der Abscherprozess fand statt. Dies wiederum verursachte in zweiter bis fünfter Überfahrt, dass dieser zerstörte Probekörper keinen Widerstand gegenüber der Maschine mehr aufbringen konnte, die Krafteintragung nicht konzentriert geschah und die Belastungsraten aus der ersten Überfahrt nicht erreicht wurden. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich eine Aussage über die Folgeverdichtung zu erbringen und ob, oder wie viele, Walzenübergänge nötig gewesen wären, um eine optimale und wirtschaftliche Verdichtung zu gewährleisten.

Im Vergleich zur ersten Phase, in der beim ersten Start eine plastische Verdichtung von 2,7 % der Gesamtprobekörperhöhe erfolgte, waren dies bei der ersten Überfahrt von Phase 2 bereits 6,4 %. Die elastische Setzung betrug circa 0,8 mm in der ersten Überfahrt und 0,5 mm während des ersten Starts.

7.2 Grafische Auswertung der Exportdateien

Zur Genauigkeitskontrolle der aufgezeichneten Daten wurden SD- und Anlagen-Export extrahiert und verglichen. Beide Datensätze konnten von sämtlichen Versuchen zur Anregungsfrequenz, Variation von Last- und Umlagerungsspannung, sowie der Simulation der Walzenüberfahrt ausgelesen werden. Stellvertretend wurde eine Auswahl getroffen, damit repräsentativ das Last-Setzungsverhalten beider Böden im zyklischen und dynamischen Bereich verifizierbar, sowie Aussagen zur Notwendigkeit einer schnellen Datenerfassung und präzisere Beurteilungen zum elastischen und plastischen Verformungsverhalten von SE und TL lieferbar sind.

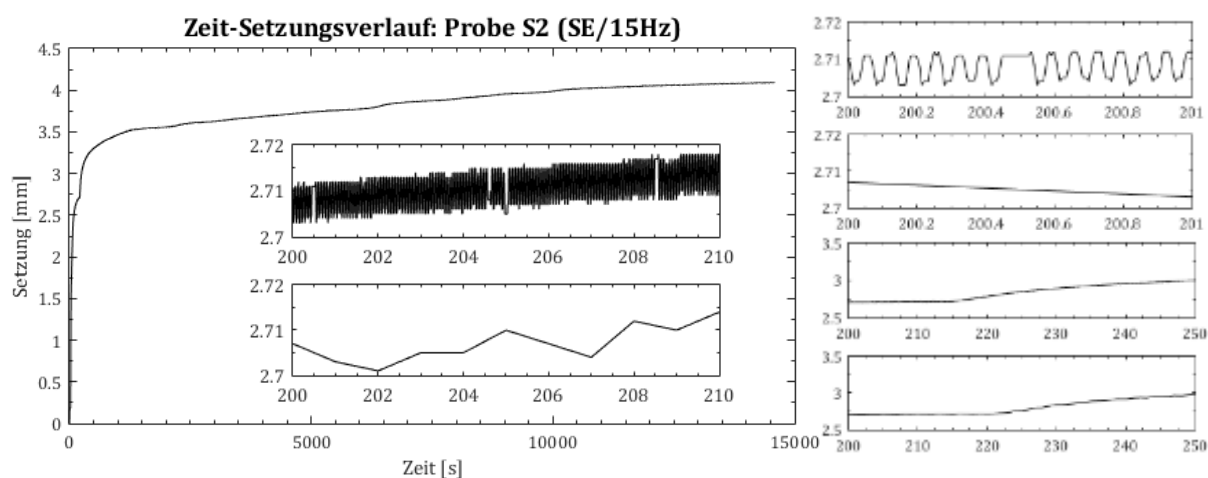


Abbildung 19: Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von SE bei 15 Hz mit 1-, 10- und 50-Sekunden-Fenster.²⁵

²⁵ genauerer SD-Export ist jeweils oberes Teilfenster.

Bespielhaft zeigte der SD-Export von SE bei 1 und 15 Hz eine viel präzisere Darstellung des Setzungsverlaufes. In der Gesamtbetrachtung bezüglich des Setzungsverhaltens ist dies jedoch weniger relevant, da beide Kurven übereinandergelegt keinen Unterschied zeigen, wie in Abbildung 20 ersichtlich ist.²⁶ Ein einfacher Datenexport der Anlage reicht in diesem Fall aus.

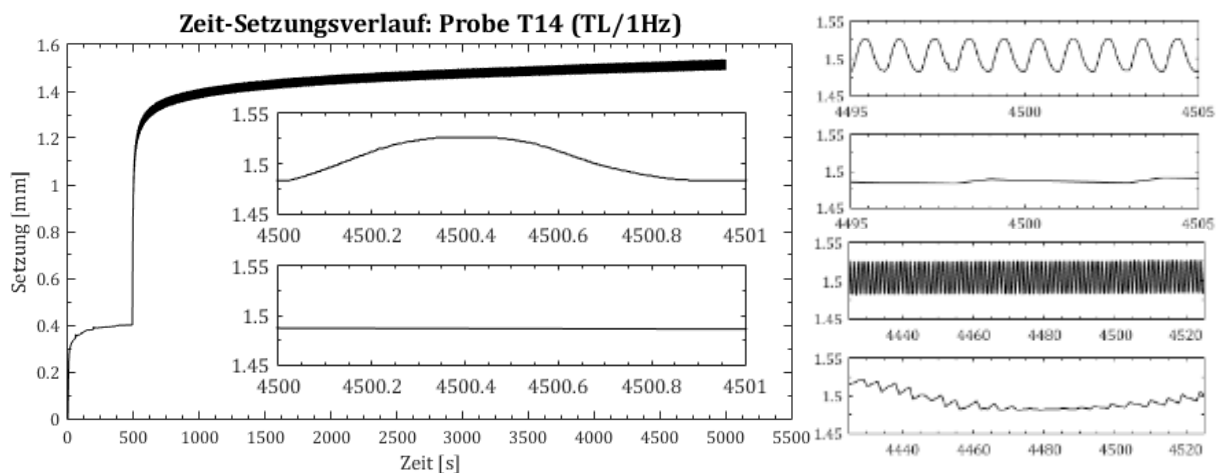


Abbildung 20: Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von TL bei 1 Hz mit 1-, 10- und 100-Sekunden-Fenster.²⁷

Ob die Prüfmaschine die vorgegebenen Frequenzen ausführt, ist lediglich am SD-Export erkennbar. TL unter 1 Hz, dessen Setzungsverhalten bei den Versuchen zur Anregungsfrequenz in Abbildung 21 näher aufgeführt ist, validiert diese Aussagen.

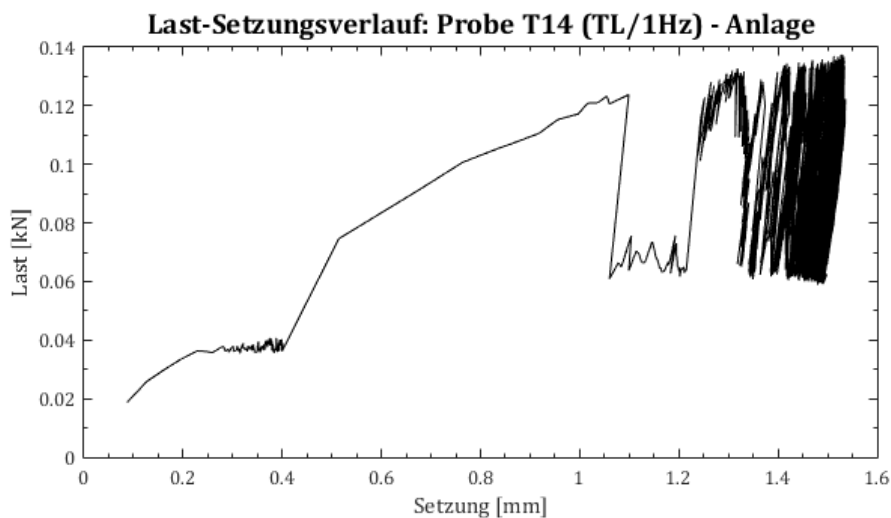


Abbildung 21: Ungenaue Darstellung des Last-Setzungsverhalten von Auelem unter 1 Hz.

Wesentlich interessanter sind die vergleichenden Darstellungen in Bezug auf das Last-Setzungsverhalten und somit die Ausformung von Hystereseschleifen während der zyklischen und dynamischen Belastung (Abbildungen 22 und 23). Hierbei ist deutlich nachvollziehbar, dass eine größere Menge an Daten erforderlich ist, um das Verformungsverhalten der Probe deutlich

²⁶ Weitere grafische Ausführungen zu diesem Vergleich befinden sich im Anhang K.

²⁷ genauerer SD-Export ist jeweils oberes Teilfenster.

darzustellen. Je stärker die Setzung zunimmt, desto besser wird die Lastamplitude erreicht. Dieses Verhalten ist bei geringer Datenmenge nicht analysierbar. Für genauere Analysen in Bezug auf Frequenzen, Amplituden und elastisches und plastisches Verformungsverhalten sind SD-Exporte notwendig und somit eine schnelle Datenerfassung, da bei derzeitiger Ausstattung der Prüfmaschine Datenexporte bis zu fünf oder mehr Stunden andauern.

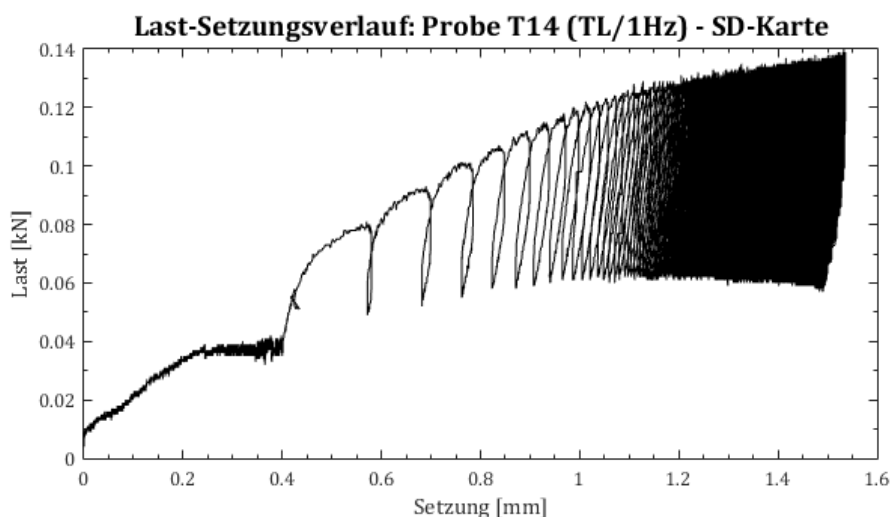


Abbildung 22: Genaue Darstellung des Last-Setzungsverhaltens von Auelehm unter 1 Hz mit Hystereseschleifen.

Früh hohe Steifigkeiten zu erreichen ist Ziel des Verdichtungsprozesses. Die Last-Setzungskurven sollten also innerhalb kürzester Zeit die gesamte Amplitude abdecken. Bei Abbildungen 22 und 23 würde dies bedeuten, dass die Graphen eher das obere Niveau auf der linken Seite erreichen, welches im rechten Bereich des Diagrammes abgebildet ist. Damit wäre das ideale Verdichtungsverhalten bezüglich des vorliegenden Bodenmaterials ermöglicht.

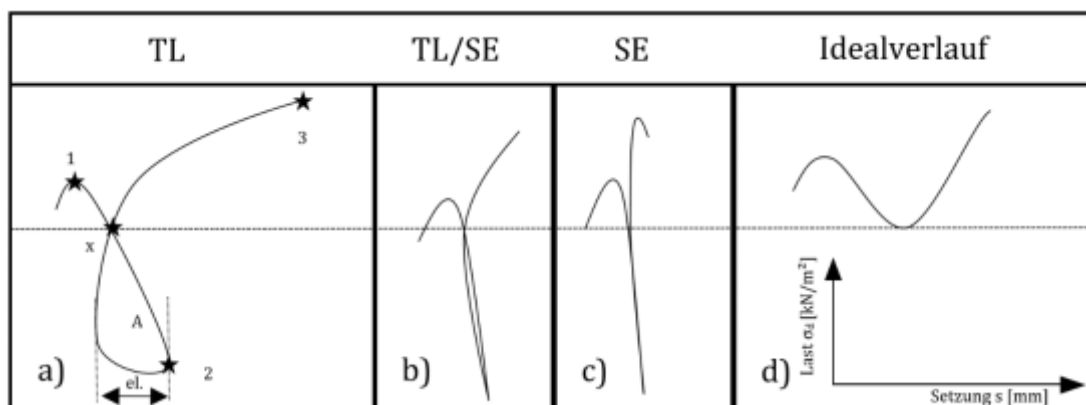


Abbildung 23: Verläufe von Hystereseschleifen.

Offen bleibt, ob eine Variation des Wassergehaltes, oder ein Arbeiten am Dichteoptimum, der 100%igen Proctordichte, ein besseres Verdichtungsbild geben würden. Gleichzeitig könnte man

Dichten außerhalb des 100% Spektrums der Proctordichte und andere Wassergehalte hinsichtlich eines günstigen Verdichtungsprozesses betrachten.

Abbildung 24 führt die verschiedenen Verläufe von Hystereseschleifen in Bezug auf TL und SE auf. Je feinteilhaltiger Böden sind, desto ausgeprägter sind diese elastischen Arbeitsschleifen bei dynamischen Verdichtungsprozessen zu observieren. Charakteristisch ist dabei zum einen die fortlaufende Setzung trotz absinkendem Lasteintrag, gekennzeichnet durch die Ziffern 1 nach 2 in Teilbild a). Im Verlauf von 2 nach 3 ist andererseits erkennbar, dass zunächst eine gewisse Arbeit, bzw. Last, nötig ist, damit eine weitere irreversible Verdichtung erzeugt wird. Der Punkt x kennzeichnet den Übergang von effizienter zu reversibler Verdichtungsarbeit bezüglich des Lasteintrags und gibt einen Mindestwert der Lastamplitude. Unterhalb dieses Punktes kommt es infolge von Porenwasserbewegungen feinteilhaltiger Böden und Porenwasserüberdruckes zum Verlust der Arbeit, sowie einem elastischen Setzungsprozess. Begründet ist dies in der Korngerüststruktur und den Umlagerungsprozessen von Porenwasser, Porenluft und Feinkornanteilen. Dieser Grenzwert x müsste demzufolge vom Verdichtungsgerät konstant gehalten werden um, wie in Teilbild d) verdeutlicht, eine ideale Arbeit zu erzielen, ohne reversible Verdichtungsvorgänge und dem damit verbundenen Zeitverlust. Teilbilder b) und c) zeigen den Verlauf der Hystereseschleifen bei SE, welcher weniger feinteilhaltig ist, auf. Vergleichbar sind diese Grafiken mit Last-Setzungsbildern von SE in Anhang J. Schlanke Schleifen symbolisieren einen geringeren Anteil an verlorener Arbeit. Der Flächeninhalt A aus Teilbild a) ist in b) und c) nicht mehr so ausgeprägt, da weniger Feinanteile vorliegen.

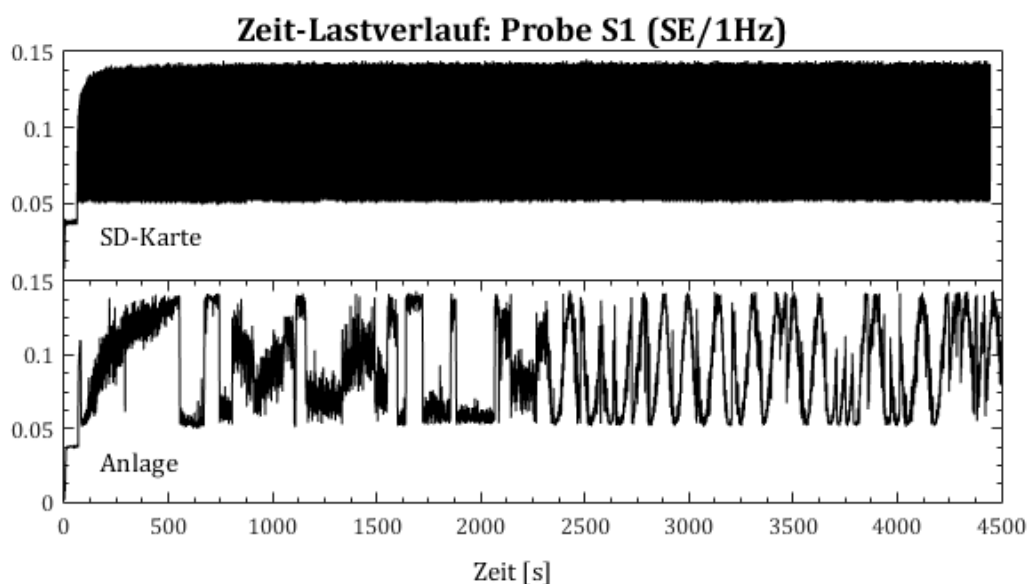


Abbildung 24: Lastamplitude bei Karlsruher Sand unter 1 Hz.

Letztendlich ist Ziel, schmale bis keine Hystereseschleifen für optimale Verdichtung feinteilhaltiger Böden hervorzurufen und die Amplitude der Last-Setzungskurve schnell nach

oben zuziehen. Die Frage der gewählten Frequenz spielt eine zusätzliche Rolle, weil beispielsweise bei $\frac{1}{2}$ Hz im Vergleich zu 1 Hz, der Boden die doppelte Zeit hätte für die elastische Ausprägung, bzw. Phase der Hystereseschleifen.

Die Darstellung der Lastamplitude von Karlsruher Sand (Abbildung 25), verdeutlicht die Aussage zur vereinfachten Analyse des Last- oder Setzungsverhaltens mit geringer Datenmenge. Hier ist ebenfalls das Treffen der gleichen Lastamplitude ersichtlich, wenn beide Kurven übereinandergelegt betrachtet werden. Jedoch ist nicht zu vernachlässigen, dass bei geringer Aufzeichnungsrate der Daten die Amplitude an verschiedenen Stellen in ihrem Verlauf angeschnitten wird und keine Aussage bezüglich des tatsächlichen Ausführens einer konstanten Lastamplitude ermöglicht wird. Im Gesamtbild ergibt die Umhüllende dennoch eine gute Aussagekraft.

Eine genauere Aufführung weiterer Vergleichsgrafiken, sowie eine grafische Gegenüberstellung von Last-Frequenz und Setzung-Zeit zu den Daten der Experimente zur Anregungsfrequenz befinden sich in Anhang J. Signifikant für die Last-Frequenz-Analyse ist ein mehrfaches Auftauchen des Frequenz-Peaks als Resonanz bei höheren Frequenzen, beispielsweise 15 Hz auch bei 30, 45, 60, 75 und 90 Hz.

7.3 Fehleranalyse

Dieses Kapitel hebt zusätzliche Rahmenbedingungen und Abläufe der Arbeit hervor, welche einen ungünstigen Einfluss auf die Durchführung und Ergebnisbeurteilung der Versuche hatten. Natürlich decken Triaxialgeräte technisch eher das Spektrum der Erdbebenuntersuchung ab und man ist nicht nur damit, als wohl größte Einwirkungsherausforderung auf jegliche Art von Konstruktionen, sondern auch mit der Prämisse Sättigung, auf der die Norm aufgebaut ist, im Bereich der Liquefaktion, auf der sicheren Seite. Weil keine Sättigungsvorgänge erfolgten und auch keine Aufnahme, bzw. Messtechnik, für die Interaktion zwischen Luftporenraum und Porenwasser zur Verfügung standen, hätte dieses außer Acht lassen der Luftkomponente ungenaue Ergebnisse dräniertes Versuche fabriziert. Es wurden dagegen undräßierte Versuche durchgeführt, was auch der Grund ist, warum in dieser Arbeit auf die Bodenverflüssigung nicht schwerpunktmäßig eingegangen wurde.

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens wären gedrungene Probekörper ($h/d = 1/1$) von Vorteil gewesen, da sie eine homogenere Verformung aufweisen, sowie ein damit verbundenes

Schmieren der Kontaktflächen zur Verringerung der Reibung.²⁸ Aus Gründen der Probekörperherstellung und technischen Ausstattung der Anlage wurde davon aber abgesehen.

Einzelne Versuche erstreckten sich über einen Zeitraum von mehreren Tagen, wobei eine Temperaturentwicklung im Arbeitsbereich der statischen Prüfpresse und infolge einer Temperatursteigerung im unteren Bereich der Druckzelle und des Zellwassers zu registrieren war. Der Einfluss der Temperatur ist im Hinblick auf die Messtechnik und bezüglich einer Entkopplung der Druckzelle mittels Kunststoffplatte zu prüfen, sowie im Zusammenhang mit 3-fach-gekoppelten Systemen²⁹ interessant.

Besonders im Hinblick auf die grafische Auswertung zum Last-Setzungsverhalten während der Versuche zur Anregungsfrequenz ist eine Validierung der Ergebnisse mit einer schnellen Datenerfassung vorzunehmen. Die Notwendigkeit der manuellen Nachsteuerung resultiert in einer gewissen Ungenauigkeit der erfassten Daten. Ebenfalls die gewählte Frequenz von 60 Hz bei der Variation von Last- und Umlagerungsspannung führte wahrscheinlich zu Ungenauigkeiten der Versuchsergebnisse, da sie im Auslastungsbereich der Anlage liegt. 70 Hz sind Obergrenze der Prüfmaschine und nach Hersteller läuft dabei im Hintergrund real eine etwas höhere Amplitude als gemessen ab. Genauso hat die Wahl von 30 Hz möglicherweise ein Resonanzverhalten von Anlage und Boden verursacht. Mit Hilfe der schnellen Datenerfassung und bereits erfolgter technischer Erweiterungen im Nachgang zu den durchgeführten Versuchen wird eine manuelle Nachsteuerung der Triaxialanlage in Zukunft nicht mehr erforderlich sein und eine Zeitersparnis bei Vorversuchen, sowie eine bessere Genauigkeit der Ergebnisse mit sich bringen.

Eine weitere Problematik ist die in einigen Versuchen durchgeführte anisotrope Konsolidation, wobei der Unterschied zu einem isotropen Konsolidationsvorgang und einem schrittweisen Aufbau der Konsolidationsspannung gebracht werden sollte.

Die Abtastrate der zyklischen und dynamischen Versuche war teilweise zu gering. Empfehlenswert wäre eine Abtastrate im 10-fachen von der aufgebrachten Frequenz. Eine Frequenz von 1 Hz würde so beispielsweise eine Abtastung von 10 Hz also 10 Messwerten pro Sekunde innehaben. Teilweise wurde die Amplitude an verschiedenen Stellen gemessen und so ergab sich die Kurvenform im Detail nicht realitätsgemäß.³⁰

²⁸ Vergleich mit KOLYMBAS (2007): Geotechnik Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. Kapitel 8.10 Fehlerquellen beim Triaxialversuch (S.147).

²⁹ Siehe Übersicht Anhang G und 9.2 Messungen anderer Einflussgrößen.

³⁰ Kapitel 7.3 betrachtet diesen Zusammenhang ausführlicher und grafisch.

8 Anwendungsgebiete

Ihren Ursprung haben Triaxialversuche im Bau militärischer Schutzeinrichtungen. Sehr bald kamen weitere Konstruktionsgebiete, wie Kraftwerkbau, Fundamente von Ölplattformen und sonstigen Offshore-Anlagen, Kernkraftwerke, Hochhäuser, Dämme, Maschinenfundamente, Rammen von Pfählen und Steinbruchsprengungen hinzu. In der Forschung spielen dabei Erdbebensicherheit, Bodenverflüssigung, Böschungsstabilität, Erschütterungsschutz, Wellen- und Erdbebenbelastung eine Rolle. Wesentliche Applikationen und Aufgaben führt STUDER (2007) in seinem Werk zur Bodendynamik auf, wie an Abbildung 26 verdeutlicht wird.

Bereich	Wesentliche Problemstellungen
Fundationen unter dynamischen Belastungen	<ul style="list-style-type: none"> • Fundamentausbildung • Vermeiden unzulässiger Deformationen und Setzungen • Aktive und passive Vibrationsisolierungen • Ausbildung der Fundation von Offshore-Ölförderplattformen, bzw. Windanlagen
Erdbebeningenieurwesen	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss der lokalen Geologie und Topographie auf die Bebenintensität • Lineares und nicht lineares Deformations- und Festigkeitsverhalten des Untergrundes bei einem Erdbeben (inkl. Böschungsstabilität) • Bemessungsbeben • Erdbebengerechtes Ausbilden von Fundationen, Stützkonstruktionen, Dämmen • Wechselwirkung zwischen Boden und Bauwerk • Mikrozonierung
Verkehrstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Befahrbarkeit natürlicher Böden (Bau-, Forst-, Landwirtschaftsbetrieb, Militär) • Dynamik von Fahrbahndecken, Dimensionierung von Flugpisten, Straßen etc. • Gleiselagerung von Hochgeschwindigkeitszügen (z.B. Feste Fahrbahn) • Dynamik des Fahrzeug-Boden-Systems
Umweltschutz	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitung von Erschütterungen • Reduktion von Erschütterungen
Bauvorgänge	<ul style="list-style-type: none"> • Aushub und Abbau; z.B. wirtschaftliches oder erschütterungsarmes Sprengen • Rammen und Ziehen von Pfählen und Spundwänden • Verdichten von Boden und Schüttungen (Schlag, Vibrationen)
Bodenerkundung	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung des Schichtaufbaus des Untergrundes • Bestimmung der Materialkennwerte von Boden und Fels in situ und im Labor
Schutzbauprobleme	<ul style="list-style-type: none"> • Übertragung von starken Erschütterungen und Stoßwellen in Boden und Fels • Deformations- und Festigkeitsverhalten von Boden und Fels unter Stoßbelastung • Ausbildung von Schutzbauten • Eindringen von Geschossen in den Boden

Abbildung 25: Hauptaufgabengebiete der Bodendynamik nach STUDER (2007).³¹

Die russische Norm bezieht sich auf Maschinenfundamente und Wasserkonstruktionen als besonderes Anwendungsgebiet. Genauer betrachtet führt sie den Verlust der Bodenfestigkeit bei dynamischer Belastung bei beliebigem Sättigungsgrad, die Gebrauchstauglichkeit für die Betriebszeit einer Anlage im Hinblick auf die Bodenverformungen aufgrund dynamischer Belastungen, die Bestimmung von E-Modul und dynamischen E-Modul, Möglichkeiten der dynamischen Verdichtung gesättigter Böden mit PPR-Wert, PGA und N_L , sowie Auswirkungen der dynamischen Bodenverflüssigung anhand δ_L und D_H , auf.³²

³¹ Entnommen aus STUDER (2007): Bodendynamik, S.2.

³² Das Abkürzungsverzeichnis und GOST R 56353 definieren diese Formelzeichen genauer.

9 Genauere Messverfahren

9.1 Lokale Messungen

Triaxiale Druckzellen sind oftmals so aufgebaut, dass Messung und Regelung von Zelldruck, Porendruck und anderen Stellgrößen, bzw. Einwirkungen, über Kopf- oder Fußstück der Druckzelle ablaufen. Dies resultiert in nicht repräsentative Ergebnisse für den relevanten Bereich der Bodenprobe. Da die Probe oben und unten gehalten ist, herrscht an diesen Stellen Reibung. Somit wird das mittlere Drittel eines Prüfkörpers zur charakteristischen Zone, was wiederum ein positiver Effekt ist, denn genau hier befindet sich die Scherfuge oder auch Scherzone. REES³³ hat in Dokumenten von GDS Instruments einige Wege aufgezeigt genauere Messungen in diesem Bereich durchzuführen.

Der Porenwasserdruck u wird beispielsweise nur am Kopf und Fuß gesteuert, was einerseits sehr sinnvoll ist zum Aufbau eines Druckgefälles und auch nötig für die Sättigung der Probe, bzw. einfach realisierbar im Aufbau einer Druckzelle, aber andererseits nicht das mittlere Drittel widerspiegelt. Genauso findet die Messung meist durch Abnahme des Porendrucks am Fuß statt, was wiederum problematisch ist falls ein Druckgefälle anliegt, welches genau am selben Punkt initiiert wird. Optimal ist eine Steuerung des Porendruckes an Kopf und Fuß und eine Messung im Bereich der Scherfuge mit Hilfe eines Porendruckmessgerätes für die Mittelebene.

Gleichermaßen spielt die Regelung des Zelldrucks, der entweder über Kopf oder Fuß einer Druckzelle aufgebaut wird, eine Rolle. Steigerung und Senkung des Zelldruckes sollten immer von oben nach unten erfolgen, weil eine viel größere Fläche beeinflusst wird als beim Axialdruck. Von Vorteil ist natürlich das keine Wandreibung herrscht, denn lediglich Latexmembranen und entlüftetes destilliertes Wasser anliegen. Jedoch sind Druckzellen meist so aufgebaut, dass der Druckstempel oberhalb des Prüfkörpers vom Zellwasser umschlossen ist und dieses hier mitwirkt. Druckzellen weisen meist eine geringe Höhe auf und daher sind hydrostatische Effekte im Bezug zur Einspeisung des Zelldruckes sehr gering.

Je nach Messinstrumenten und Versuchssteuerung geschieht eine Beurteilung der globalen Verformung über eine Registrierung der Änderung von Initialabmaßen der Probe an den Enden der Probe. Dies ist ebenfalls nicht repräsentativ für das mittlere Drittel. Bender-Elemente und Hall-Sensoren können hier Abhilfe schaffen.

Genauso ist es nicht sinnvoll radiale Verformungen anhand von globalen Verformungen festzumachen, worauf aber im Kapitel 5 in der Diskussion über den K0-Versuch spezifischer eingegangen wird. Oft haben Druckzellen im Bereich von Kopf- und Fußstücken mehrere Zugangsventile zum inneren der Druckzelle, sodass weitere Sensoren im Inneren der Probe

³³ REES (2013). What is Triaxial Testing? Part two: Advanced Triaxial Testing. GDS Instruments.

anzubringen und diese nach Außen anzuschließen. Bedenklich ist hier nur die Beeinflussung des Probekörpers, denn dieser sollte beim Einbau in die Druckzelle, der ohnehin schon viele Schwierigkeiten darstellt, unberührt bleiben. Lokale Messungen sind schwer durchzuführen und dennoch hochinteressant in Bezug auf die Genauigkeit und den Anspruch an Einbau, Versuchssteuerung und Messtechnik.

Eine weitere Möglichkeit der Untersuchung sind visuelle Messungen mit denen sich OKUBO 2007 beschäftigte. Dabei wurde ein Materialvergleich bezüglich verschiedener Auswahlkriterien zwischen Acryl, Glas und Polycarbonat vorgenommen und der Bau einer transparenten Triaxialdruckzelle³⁴ beschrieben, um Kriechvorgänge und laterale Dehnung fotografisch zu dokumentieren.

9.2 Messungen anderer Einflussgrößen

Bestimmte Anwendungsgebiete, wie Konstruktion von Anlagen für radioaktives Material oder Erforschung von Erdbeben, wären auch mit Hilfe zusätzlicher Messtechnik nachstell- und prüfbar. So könnte man beispielsweise sogenannte dreifachgekoppelte Systeme beurteilen. Herkömmliche Triaxialgeräte untersuchen den Boden auf mechanisch-hydraulische Eigenschaften. Eine zusätzliche thermische Komponente wäre in der Lage Temperatureinflüsse, verursacht durch radioaktives Material, auf den Boden mit analysieren.

Im Forschungsgebiet des Erdbebensicheren Bauens finden sich die Begriffe von seismischen P- und S-Wellen, wobei die Primärwellen einen verdichtenden Charakter besitzen und Sekundärwellen eher als Scherwellen betrachtet werden. Beim Bender Element Test (REES, 2013) erfolgt die Abschätzung des maximalen Schermoduls G durch Induktion und Messung von Spannungen in Form von P- und S-Wellen mit Hilfe von paarweise horizontal und vertikal in Probe eingebrachten Bender-Elementen.

Falls Boden in der Vergangenheit einer Belastung ausgesetzt waren, die größer war als die Belastung zum Zeitpunkt der Probenentnahme, kann dies durch eine Überkonsolidation der Probe simuliert werden.

9.3 Auswahl des Prüfverfahrens für dynamische Belastungen

Während STUDER (2007) eine Auswahl des Laborversuches anhand der gesuchten dynamischen Bodenparameter vornimmt, wie beispielsweise RC-Test für G-Modul, E-Modul und Dämpfung oder zyklischer Triaxialtest für E-Modul, Dämpfung und Festigkeitseigenschaften, sehen

³⁴ OKUBO, S. (2007). Development of a transparent triaxial cell and observation of rock deformation in compression and creep tests.

BECKER (2012) und die GOST (2015) zusätzlich eine Auswahl des Prüfverfahrens angesichts der Eingabeparameter vor. Der Resonant-Column-Test, auch Resonanzsäule genannt, dient der Ermittlung von Materialdämpfung und dynamischem Deformationsmodul. Wobei dynamische Triaxialversuche eher für niedrige Frequenzen und hohe Axialdehnungsamplituden geeignet sind, ist es beim RC-Test genau umgekehrt.³⁵ Weiterhin existiert der sogenannte Torsionsscherversuch, oder Torsionsversuch, welcher ähnlich wie der RC-Test durchgeführt wird, aber die Probe Drehschwingungen bei konstanter Frequenz und zunehmender Kraft ausgesetzt ist.

³⁵ BECKER 2012: S. 43 und GOST 2015: S. 10 f.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In der Gesamtbetrachtung der erfolgten Versuche ist ersichtlich, dass es mit Hilfe der Triaxialanlage nicht nur möglich ist herkömmliche Laborversuche durchzuführen, sondern auch individuelle bautechnische Vorgänge und Zustände zu untersuchen. Komplexe Vorbereitung, Ausführung und Evaluierung statischer und dynamischer Triaxialversuche hat und wird vermutlich noch für einige Zeit den Einzug dieser Laborprüfung in gemeine Prüfeinrichtungen verhindern, es sei denn eine stark vereinfachte Versuchssteuerung, gute Finanzierbarkeit, große Datenbank an Referenzwerten zur verkürzten Durchführung und eine enge Kooperation und Hilfestellung zwischen Nutzern und Nutzern und Herstellern werden durch entsprechendes Marketing realisiert oder suggeriert.

Die Bereitstellung von Protokollen für Vorbereitung des Versuchsstandes, Durchführung und Evaluierung einzelner Tests ist vorteilhaft, da deutsche Normen sehr genau Auskunft darüber geben welche Angaben in der Auswertung auftauchen müssen und weniger bis keine Vorgaben zur Ausführung individueller, komplexerer Fragestellungen diskutiert oder aufgeführt sind. Eine Zusammenstellung der Richtwerte für Anlagendimensionierung nach Norm sollte bei individuellen Modifikationen beachtet werden.


Sinnvoll wäre eine Gegenüberstellung und Zusammenfassung von bodenmechanischen Laborversuchen hinsichtlich Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit mittels Triaxialanlage, beziehungsweise Vergleiche wie die von Rahmenscherversuch mit einem statischen UU-Versuch und K0-Versuch mit einaxialen Kompressionsversuch, die Bestandteil von Ingenieurpraktikum und Bachelorarbeit waren.

Die Optimierung der Versuchssteuerung muss sich anhand jener Zusammenstellung und der umfangreichen Betrachtung individueller bautechnischer, geotechnischer und bodendynamischer Anwendungen und Vorgänge orientieren. Bei letzterem sollte der Fokus auf Großvorhaben liegen um eine Wirtschaftlichkeit zeitintensiver Forschungen und Aufträge zu gewährleisten.

Es sollten für mehrere Böden Referenzwerte vorhanden und einfach zugänglich sein.

Anhang A: Protokolle

A.1 Wassergehalt Probekörper

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig Fakultät Bauwesen Lehrbereich Bodenmechanik, Grund-, Fels- und Tunnelbau G ² Gruppe Geotechnik - Prof. Thiele Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig	 Tel: 0341/3076 6463 Fax: 0341/3076 6404 e-mail: ralf.thiele@htwk-leipzig.de																																																																																													
<h3>Bestimmung des Wassergehalts</h3>																																																																																														
nach DIN 18 121 Datei: Protokoll_Wassergehalt-aeulehm 2. Lage.xlsx	Anlage: _____ Seite: _____ Protokoll-Nr.: _____																																																																																													
Bauvorhaben: Auelehm #2 Projektbearbeiter: _____	Projekt-Nr.: _____																																																																																													
Bemerkungen: _____ _____ Laborprüfer: _____	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Versuch 1</th> <th>Versuch 2</th> <th>Versuch 3</th> <th>Versuch 4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Entnahmestelle</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tiefe</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Bodenart</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">Auelehm</td> </tr> <tr> <td>Probennummer</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">T13-OED</td> </tr> <tr> <td>Datum</td> <td style="text-align: center;">16.05.2016</td> <td style="text-align: center;">16.05.2016</td> <td style="text-align: center;">16.05.2016</td> <td style="text-align: center;">01.06.2016</td> </tr> </tbody> </table>		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Entnahmestelle					Tiefe					Bodenart	Auelehm				Probennummer	1	2	3	T13-OED	Datum	16.05.2016	16.05.2016	16.05.2016	01.06.2016																																																															
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4																																																																																										
Entnahmestelle																																																																																														
Tiefe																																																																																														
Bodenart	Auelehm																																																																																													
Probennummer	1	2	3	T13-OED																																																																																										
Datum	16.05.2016	16.05.2016	16.05.2016	01.06.2016																																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Bezeichnung</th> <th>Formel</th> <th>Einheit</th> <th>Versuch 1</th> <th>Versuch 2</th> <th>Versuch 3</th> <th>Versuch 4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Behälter-Nr.</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">26</td> <td style="text-align: center;">13</td> <td style="text-align: center;">16</td> </tr> <tr> <td>Behälter</td> <td style="text-align: center;">m_{B1}</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td style="text-align: center;">46,31</td> <td style="text-align: center;">45,19</td> <td style="text-align: center;">46,27</td> <td style="text-align: center;">92,42</td> </tr> <tr> <td>feuchte Probe + Behälter = $m_1 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">$m_1 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td style="text-align: center;">122,47</td> <td style="text-align: center;">124,89</td> <td style="text-align: center;">127,11</td> <td style="text-align: center;">164,37</td> </tr> <tr> <td>trockene Probe + Behälter = $m_2 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">$m_2 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td style="text-align: center;">113,11</td> <td style="text-align: center;">114,52</td> <td style="text-align: center;">117,25</td> <td style="text-align: center;">155,04</td> </tr> <tr> <td>Wasser = $(m_1 + m_{B1}) - (m_2 + m_{B1})$</td> <td style="text-align: center;">m_w</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td style="text-align: center;">9,36</td> <td style="text-align: center;">10,37</td> <td style="text-align: center;">9,86</td> <td style="text-align: center;">9,33</td> </tr> <tr> <td>trockene Probe = $(m_2 + m_{B1}) - m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">m_d</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td style="text-align: center;">66,80</td> <td style="text-align: center;">69,34</td> <td style="text-align: center;">70,98</td> <td style="text-align: center;">62,62</td> </tr> <tr> <td>Wassergehalt = m_w/m_d</td> <td style="text-align: center;">w</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">0,140</td> <td style="text-align: center;">0,150</td> <td style="text-align: center;">0,139</td> <td style="text-align: center;">0,149</td> </tr> <tr> <td>Wassergehalt</td> <td style="text-align: center;">w</td> <td style="text-align: center;">%</td> <td style="text-align: center;">14,0</td> <td style="text-align: center;">15,0</td> <td style="text-align: center;">13,9</td> <td style="text-align: center;">14,9</td> </tr> </tbody> </table>	Bezeichnung	Formel	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Behälter-Nr.		-	30	26	13	16	Behälter	m_{B1}	g	46,31	45,19	46,27	92,42	feuchte Probe + Behälter = $m_1 + m_{B1}$	$m_1 + m_{B1}$	g	122,47	124,89	127,11	164,37	trockene Probe + Behälter = $m_2 + m_{B1}$	$m_2 + m_{B1}$	g	113,11	114,52	117,25	155,04	Wasser = $(m_1 + m_{B1}) - (m_2 + m_{B1})$	m_w	g	9,36	10,37	9,86	9,33	trockene Probe = $(m_2 + m_{B1}) - m_{B1}$	m_d	g	66,80	69,34	70,98	62,62	Wassergehalt = m_w/m_d	w	-	0,140	0,150	0,139	0,149	Wassergehalt	w	%	14,0	15,0	13,9	14,9	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Versuch 5</th> <th>Versuch 6</th> <th>Versuch 7</th> <th>Versuch 8</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Entnahmestelle</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tiefe</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Bodenart</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Probennummer</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Datum</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8	Entnahmestelle					Tiefe					Bodenart					Probennummer					Datum				
Bezeichnung	Formel	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4																																																																																								
Behälter-Nr.		-	30	26	13	16																																																																																								
Behälter	m_{B1}	g	46,31	45,19	46,27	92,42																																																																																								
feuchte Probe + Behälter = $m_1 + m_{B1}$	$m_1 + m_{B1}$	g	122,47	124,89	127,11	164,37																																																																																								
trockene Probe + Behälter = $m_2 + m_{B1}$	$m_2 + m_{B1}$	g	113,11	114,52	117,25	155,04																																																																																								
Wasser = $(m_1 + m_{B1}) - (m_2 + m_{B1})$	m_w	g	9,36	10,37	9,86	9,33																																																																																								
trockene Probe = $(m_2 + m_{B1}) - m_{B1}$	m_d	g	66,80	69,34	70,98	62,62																																																																																								
Wassergehalt = m_w/m_d	w	-	0,140	0,150	0,139	0,149																																																																																								
Wassergehalt	w	%	14,0	15,0	13,9	14,9																																																																																								
	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8																																																																																										
Entnahmestelle																																																																																														
Tiefe																																																																																														
Bodenart																																																																																														
Probennummer																																																																																														
Datum																																																																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Bezeichnung</th> <th>Formel</th> <th>Einheit</th> <th>Versuch 5</th> <th>Versuch 6</th> <th>Versuch 7</th> <th>Versuch 8</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Behälter-Nr.</td> <td></td> <td style="text-align: center;">-</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Behälter</td> <td style="text-align: center;">m_{B1}</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>feuchte Probe + Behälter = $m_1 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">$m_1 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>trockene Probe + Behälter = $m_2 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">$m_2 + m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wasser = $(m_1 + m_{B1}) - (m_2 + m_{B1})$</td> <td style="text-align: center;">m_w</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>trockene Probe = $(m_2 + m_{B1}) - m_{B1}$</td> <td style="text-align: center;">m_d</td> <td style="text-align: center;">g</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wassergehalt = m_w/m_d</td> <td style="text-align: center;">w</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wassergehalt</td> <td style="text-align: center;">w</td> <td style="text-align: center;">%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Bezeichnung	Formel	Einheit	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8	Behälter-Nr.		-					Behälter	m_{B1}	g					feuchte Probe + Behälter = $m_1 + m_{B1}$	$m_1 + m_{B1}$	g					trockene Probe + Behälter = $m_2 + m_{B1}$	$m_2 + m_{B1}$	g					Wasser = $(m_1 + m_{B1}) - (m_2 + m_{B1})$	m_w	g					trockene Probe = $(m_2 + m_{B1}) - m_{B1}$	m_d	g					Wassergehalt = m_w/m_d	w	-					Wassergehalt	w	%																																			
Bezeichnung	Formel	Einheit	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8																																																																																								
Behälter-Nr.		-																																																																																												
Behälter	m_{B1}	g																																																																																												
feuchte Probe + Behälter = $m_1 + m_{B1}$	$m_1 + m_{B1}$	g																																																																																												
trockene Probe + Behälter = $m_2 + m_{B1}$	$m_2 + m_{B1}$	g																																																																																												
Wasser = $(m_1 + m_{B1}) - (m_2 + m_{B1})$	m_w	g																																																																																												
trockene Probe = $(m_2 + m_{B1}) - m_{B1}$	m_d	g																																																																																												
Wassergehalt = m_w/m_d	w	-																																																																																												
Wassergehalt	w	%																																																																																												

A.2 Proctordichte/-kurve

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

Fakultät Bauwesen

Lehrbereich Bodenmechanik, Grund-, Fels- und Tunnelbau

G² Gruppe Geotechnik - Prof. Thiele

Karl-Liebknecht-Straße 132

04277 Leipzig

Tel: 0341/3076 6463

Fax: 0341/3076 6404

e-mail: ralf.thiele@htwk-leipzig.de



Bestimmung der Dichte

Proctorversuch
nach DIN 18127

Datei: Protokoll_Proctorversuch1.xlsx

Anlage: _____

Seite: _____

Protokoll-Nr.: _____

Bauvorhaben: TCDyn

Projekt-Nr.: _____

Projektbearbeiter: _____

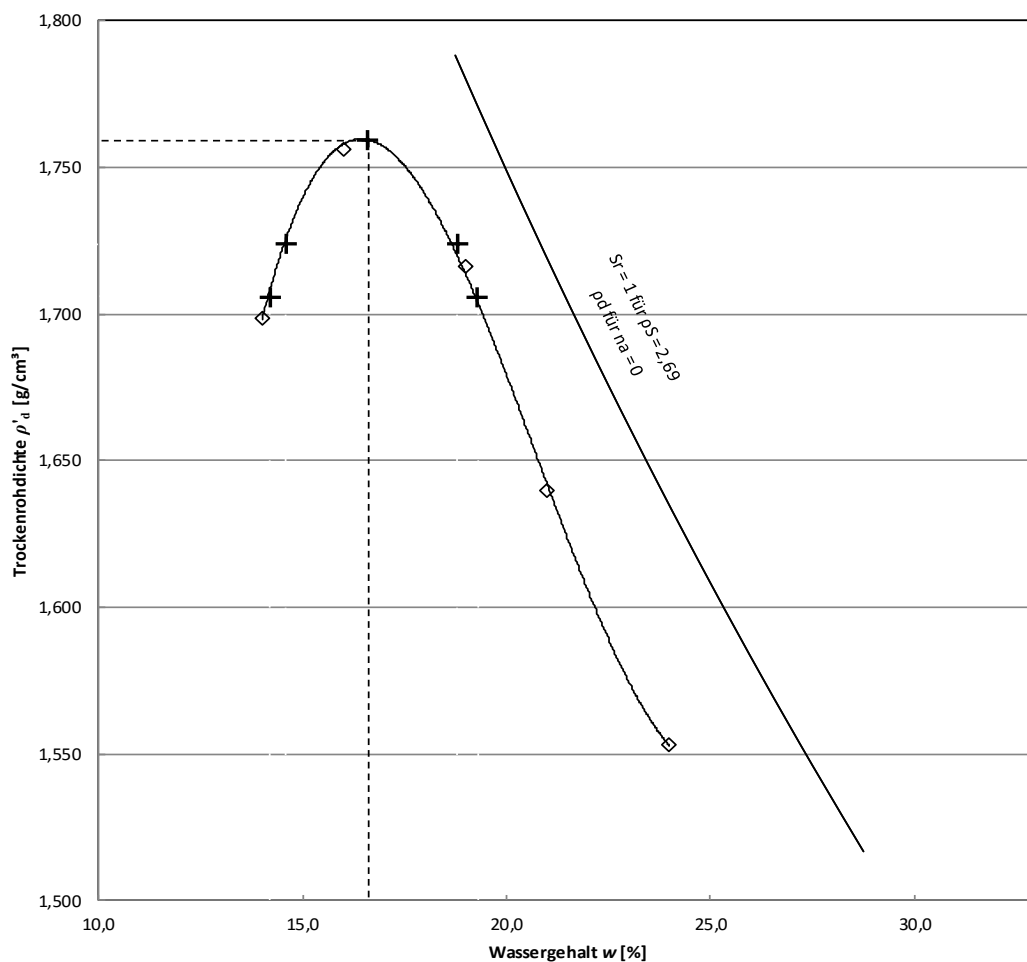
Datum: 19.05.2016

Entnahmestelle: Löbnitz

Tiefe: -

Probennummer: T11

Bemerkung: Auelehm





100% der Proctordichte $\rho_{PR} = 1,759$ g/cm³ Optimaler Wassergehalt $w_{pr} = 16,6$ %

98% der Proctordichte $\rho_d = 1,724$ g/cm³ min | max Wassergehalt $w = 14,6$ | 18,8 %

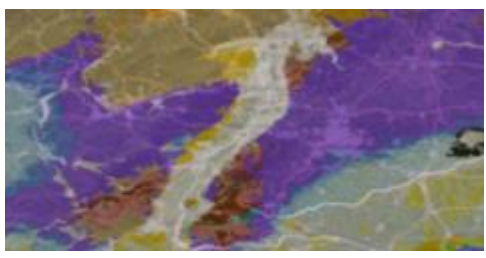
97% der Proctordichte $\rho_d = 1,706$ g/cm³ min | max Wassergehalt $w = 14,2$ | 19,3 %

A.3 Bodenmechanisches Datenblatt Karlsruher Sand (SE)

<p>TCDyn Entwicklung einer Hochfrequenz-Triaxialzelle zur Untersuchung dynamisch angeregter teilgesättigter Böden Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand ZIM Förderkennzeichen: KF2180220SA4 (FTZ) KF3422001SA4 (Geomation)</p>	<p style="font-size: small;">Geändert durch:</p>  <p style="font-size: x-small;">aufgrund einer Zerschließung des Deutschen Bundestages</p> 
<p>Bodenmechanisches Datenblatt zum Versuchsmaterial "Karlsruher Sand"</p>	

Hintergrund
 Dynamische und statische Verformungsmessungen lassen sich an enggestuften, feinteilarmen Böden optimal ausführen. Der Vorteil dieser Materialien liegt in einer sehr guten Reproduzierbarkeit von Messergebnissen, moderaten Verformungen vor und nach dem Versagenszustand und einem vergleichsweise einfachen Probenvorbereitung. Im Rahmen des ZIM Projektes TCDyn dient der Karlsruher Sand als Versuchsmaterial und steht in Bezug zu vielen Erfahrungen und Veröffentlichungen.

geologische Information
 In der Würm-Kaltzeit (vor ca. 115.000 bis 10.000 a) entstanden glaziale Ablagerungen alpiner Materialien in der Oberrheinebene in Form einer Niederterrasse. Diese wurden nachfolgend dauerhaft durch die Sedimentfracht der rheinischen Seitenflüsse verändert. Diese Sedimentation erfolgte in Form großer Binnendünen und Flugsanddecken. Dabei ist eine Zunahme der Quarzanteile und der Materialhelligkeit von Süden nach Norden festzustellen. Nördlich des Karlsruher Raumes ist demnach die Geologie durch das Vorliegen ganzer Dünenzüge geprägt.



Herkunft
 Friedrich Quarzsande GmbH & CO. KG
 Südbeckenstr. 30, D-76189 Karlsruhe
 "K 3 (0,10 – 0,60 mm) feuergetrocknet"

bodenmechanische Analyse

Proctorwerte:
 $\rho_{pr} = 1,61 \text{ g/cm}^3$
 $w_{opt} = 15,8 \%$

Korndichte:
 $\rho_s = 2,639 \text{ g/cm}^3$

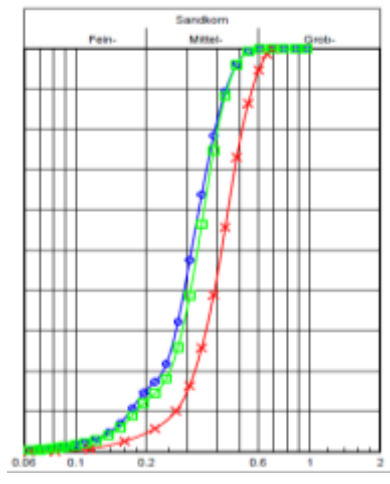
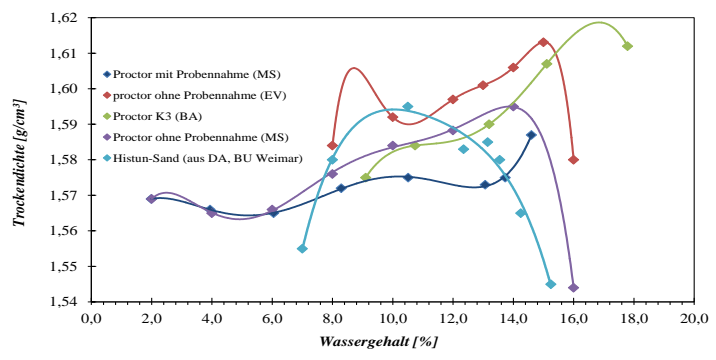
Kornverteilung:
 $d_{10} = 0,19 \text{ mm}$
 $d_{20} = 0,24 \text{ mm}$
 $d_{30} = 0,28 \text{ mm}$
 $d_{50} = 0,32 \text{ mm}$
 $d_{60} = 0,34 \text{ mm}$
 $d_{80} = 0,40 \text{ mm}$
 $d_{100} = 1,0 \text{ mm}$

$C_u = 2,0$
 $C_c = 1,3$

$k_f \text{ (Hazen)} = 3,3 \dots 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Schüttdichte: Härte nach Mohs:
 $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$ 7

Glühverlust: pH-Wert (CaCl):
 $V_{gl} = 0,1\%$ 6



TCDyn

Entwicklung einer Hochfrequenz-Triaxialzelle zur Untersuchung dynamisch angeregter teilgesättigter Böden

Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand ZIM

Förderkennzeichen: KF2180220SA4 (FTZ)
KF3422001SA4 (Geomation)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Bodenmechanisches Datenblatt zum Versuchsmaterial "Karlsruher Sand"



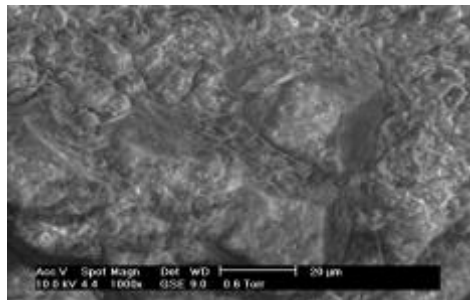
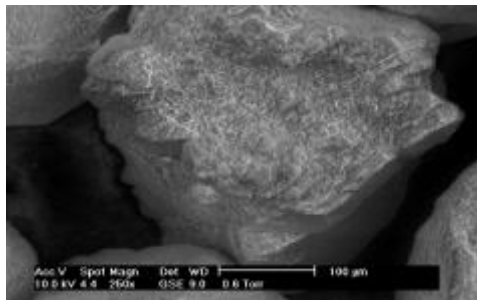
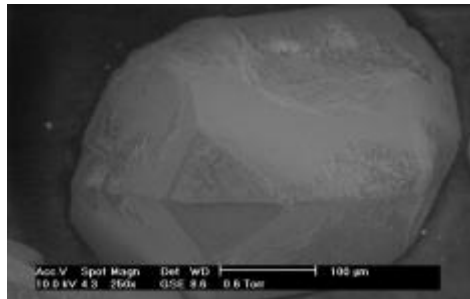
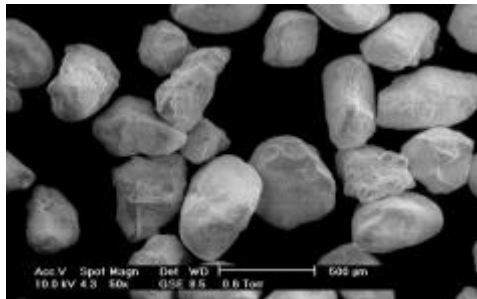
Kornbeschreibung

gleichförmig, Mineralbestand einheitlich (Quarereinheit: ca. 96 % SiO_2)

gute bis mäßige Rundung, Kristallflächen z.T. erkennbar

mittlere Oberflächenlösung gut erkennbar (ESEM)

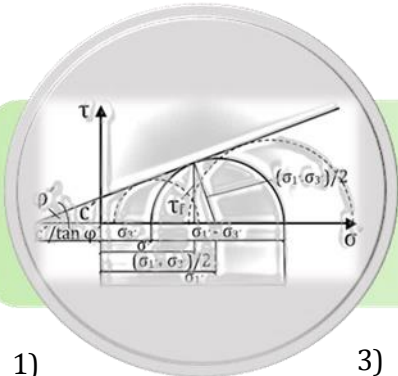
Bildnachweis



Scherparameter

Anhang B: Protokolle K0-Versuch

B.1 Vorbereitung Versuchsstand



K0-Versuch

Anpassung Prüfpresse

Modifikation der Prüfpresse für statische Triaxialversuche

1)

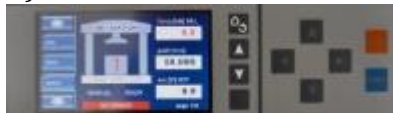


3)



- 1) Lastsensor (2kN)
- 2) Lastsensor (50kN)
- 3) Anschluss Lastsensor
- 4) Display Versuchsstand
- 5) Kopfleiste
- 6) Kopfstück mit 4 Schraube
- 7) Adapter
- 8) Druckzelle
- 9) Sicherungsring
- 10) Zelldruck, Ventile
- 11) Bewegungsmesser
- 12) Anschlüsse Bewegungsmesser
- 13) Display Zelldruck
- 14) Display Porendruck
- 15) Kugel
- 16) Porendruckmessgerät

4)



5)



6)



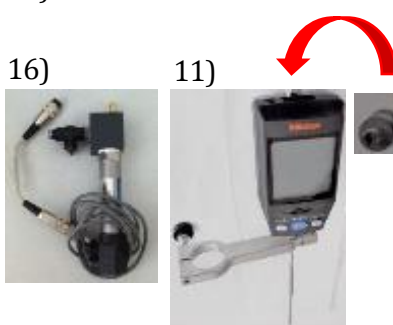
2)

8)



9)

10)



16)



11)



12)



15)



13)



14)



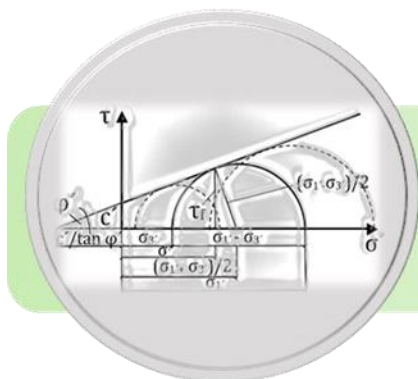
1. Kopfstempel anpassen

- Aufbau Kopfstempel prüfen
- Lastsensor (1) anschließen
- Versuchsstand Power ON
- Menü: (dynamisch) Kopfleiste (5) hochfahren
- Versuchsstand Power OFF
- Kopfstück mit 4 Schrauben (6) montieren (Größe)
- restliches Kopfstück (6, 2, 7) montieren (Anschlüsse kontrollieren)

2. Druckzelle einbauen

- Sicherungsring (9) fest?
- Druckzelle auf Versuchsstand heben (Ventile vorn)
- Bewegungsmesser (11,12) anbringen
- Zelldruck, Porendruck anschließen (8,10), Ventile öffnen
- Porendruckmessgerät anschließen (16), Ventil öffnen
- Versuchsstand + Steuergeräte Power ON
- Porendruck und Zelldruck (13,14) aus Fehlerbereich fahren
- Sicherungsring (9) lockern, Kugel (15) auflegen, Druckzelle hochfahren (4)

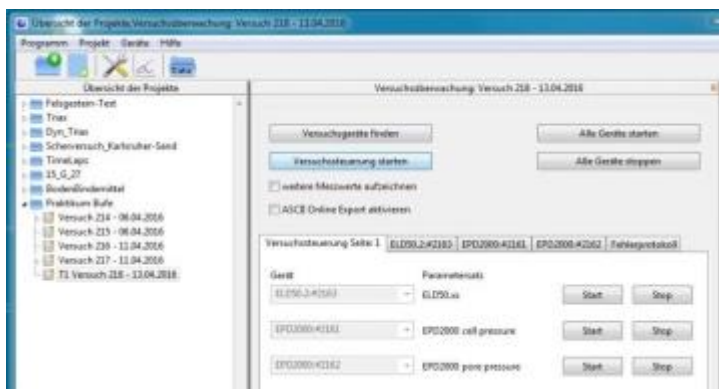
B.2 Durchführung



Versuchssteuerung Triaxialversuch

K0-Versuch mit Querdehnung

Last-Setzungsversuch ohne Wandreibung mit Vorgabe der Poisson-Zahl



1. Projekt einrichten

- Programm GeoDESC öffnen
- neues Projekt und Versuch "K0 mit Querdehnung"
- Geräte auswählen (Zelldruck und Prüfpresse), "Versuchsgeräte finden", "Versuchssteuerung starten"

2. Eingabe in Excel

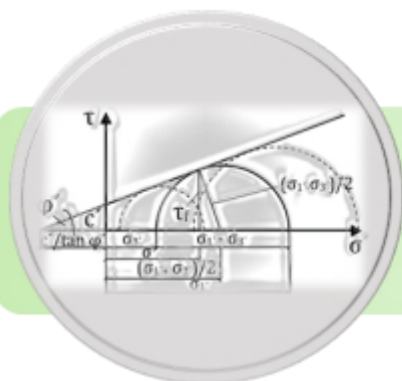
- individuelle Programmierung notwendig (Voreinstellungen entsprechen Randparametern des K0-Versuches dieser Arbeit)
- Wechseln zu GeoDESC: "alle Geräte starten"

	B	C	D
Einstellungen			
Probedurchmesser		99,7	mm
Abtastzeit		1	Ts in s
Maximallast		2	kN
Maximalsetzung		22	mm
Probenkontakt		☑	
Poisson-Zahl		0,35	
Eingabewerte			
Auflast		0	kN
Aktueller Messwert			
Auflast		1,562866688	kN
Setzung		1,609125018	mm
σ_1		107,6923077	kPa
$\sigma_{2,3}$		13,2	kPa

3. Datenauslese

- via Datenexport des ausgewählten Parameters (CSV-Format), bzw. Speicherung der Excel-Mappen

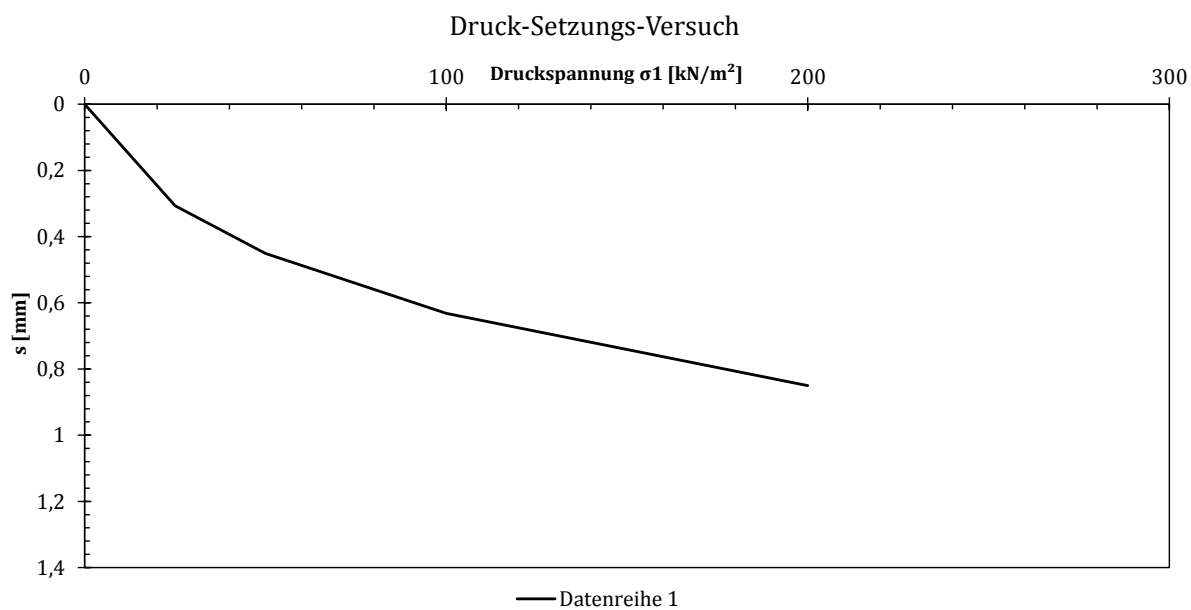
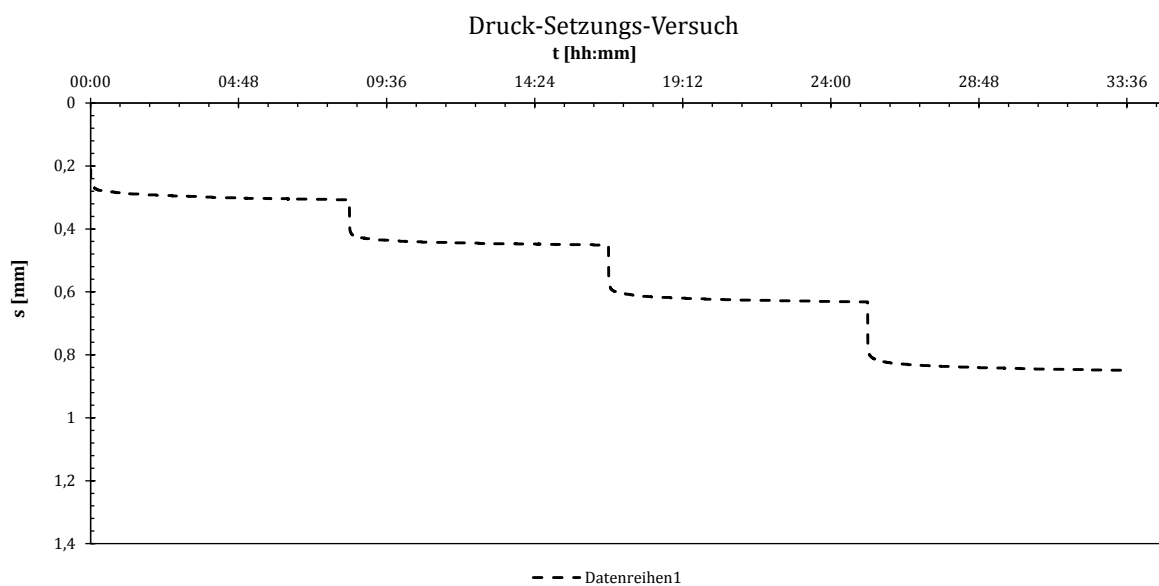
B.3 Grafische Auswertung



K0-Versuch mit Querdehnung

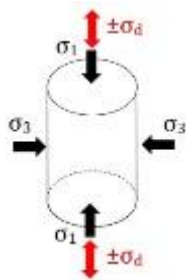
Last-Setzungsversuch

Grafische Auswertung der Exportdateien mit Excel



Anhang C: Protokolle Anregungsfrequenz

C.1 Versuchsschema



Vergleichende Betrachtung von Auelehm (TL) und Karlsruher Sand (S) im zyklischen/dynamischen Triaxialversuch

Durchmesser [mm]	50
Höhe [mm]	120

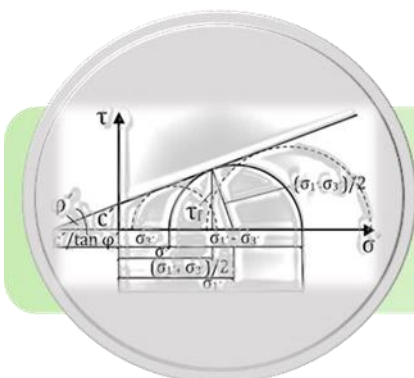
1. Festlegung einer gemeinsamen Anregungsfrequenz

	A1 TL	A2 S
Axialdruck σ_1 [kN/m ²]	20	20
dyn. Auflast σ_d [kN/m ²]	55*	55*
Zelldruck σ_3 [% von σ_1]	50	70
Frequenzen f [Hz]	1,15,30,60**	1,15,30,60**

*BOMAG BP 12/40: $F/A = 12\text{kN} / (0,542\text{m} * 0,4\text{m}) = 55,35\text{ kN/m}^2$, bzw. BOMAG BP 10/35 hat $53,71\text{ kN/m}^2$

**Abtastung einzelner relevanter Frequenzen an jeweils 4 Probekörpern (1 Hz für Zyklisch, 15 Hz für Dynamik, 30 Hz für Arbeitsbereich häufig verwendeter Maschinen, 60 Hz für Grenzbereich Prüfmaschine) mit Lastamplitude charakteristisch für Vibrationsverdichtung 50 – 200 kPa (0,05 bis 0,2 entspricht auch Arbeitsbereich der Prüfmaschine)

C.2 Vorbereitung Versuchsstand



Vorbereitung Versuchsstand

Anpassung Prüfpresse

Modifikation der Prüfpresse für zyklische und dynamische Triaxialversuche

5.7.8



- 1) Lastsensor
- 2) Display Versuchsstand
- 3) Kopfleiste
- 4) Kopfstück mit 4 Schrauben
- 5) Druckzelle
- 6) inkrementeller Wegsensor
- 7) Sicherungsring
- 8) Zelldruck, Ventile
- 9) Display Zelldruck

3



4



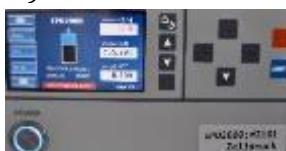
1,6



2



9



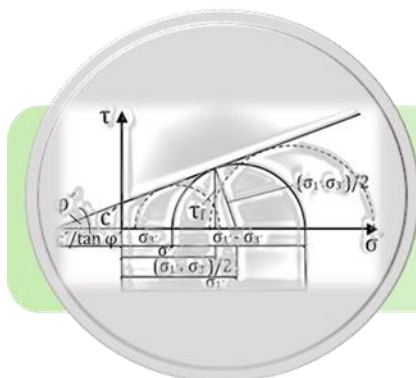
1. Kopfstempel anpassen

- Aufbau Kopfstempel prüfen
- Kopfstück mit 4 Schrauben entfernen
- Lastsensor (2kN) anschließen
- Versuchsstand Power ON
- Menü: (statisch) Bodenstück hochfahren, (dynamisch) Kopfstück runterfahren
- Versuchsstand Power OFF
- restliches Kopfstück anpassen (Anschlüsse kontrollieren)

2. Einbau Druckzelle

- Sicherungsring fest?
- Druckzelle auf Versuchsstand heben (Ventile vorn)
- Bewegungsmesser an Kopfstück der Druckzelle
- Zelldruck anschließen, Ventile öffnen
- Versuchsstand + Steuergeräte Power ON
- Zelldruck aus Fehlerbereich fahren
- Sicherungsring lockern, Kugel auflegen, Kopfstück runterfahren

C.3 Durchführung



Versuchssteuerung Triaxialversuch

Abtastung verschiedener Frequenzen

Manuelle Steuerung zyklischer und dynamischer Triaxialversuche

Das Screenshot zeigt die Software-Steuerung für einen Triaxialversuch. Die Benutzeroberfläche ist in mehrere Bereiche unterteilt:

- Projektstruktur (links):** Zeigt eine hierarchische Auflistung der Versuchskomponenten, darunter 'EPD2000-#2181' und 'ELD50-#2181' mit verschiedenen Parametern wie 'Soil_force', 'Soil_frequency' und 'Soil_settlement'.
- Versuchsüberwachung (Mitte):** Enthält Schaltflächen für 'Versuchspunkte finden', 'Alle Geräte starten', 'Versuchssteuerung starten' und 'Alle Geräte stoppen'. Es gibt auch Kontrollkästchen für 'weitere Messwerte aufschreiben' und 'AISC3 Online Export aktivieren'.
- Versuchssteuerung (unten links):** Enthält 'Gerätesteuerung' mit 'Start' und 'Stop' Knöpfen sowie 'Spannungverformungskennlinie auflösen'.
- Information (unten rechts):** Zeigt Details zum Gerätetyp (Z183), Seriennummer (2183) und Status (Gerät gestartet).
- Versuchsdaten (unten rechts):** Eine Tabelle mit den folgenden Spalten: Parametername, Sollwert, Messwert, Maximalwert.

Parametername	Sollwert	Messwert	Maximalwert
mode	2	2	5
option	1	1	1
sampling rate	50	50,00	1000,00 Hz
force	0,093	0,068	2,00 kN
force-amplitude	0,108	0,11	1,00 kN
frequency	1	1,00	100,00 Hz
dynamic-phaseshift	0	0,00	360,00 grad
dynamic-periods	0	0,00	100,00
settlement	0	2,2110	100,0000 mm
speed	0	0,00	10,00 mm/min
force-max	0	2,000	2,000 kN
settlement-max	0	100,0	100,0 mm

1. Projekt einrichten

- Programm GeoDESC öffnen
- neues Projekt und Versuch (Name), "manueller Versuch ohne Steuerung"
- Geräte auswählen (Zelldruck und Prüfpresse), "Versuchsgeräte finden"

2. Phase 1 (σ_1 und σ_3)

- EPD2000: Eingabe pressure (kPa)
- ELD50: Eingabe Sollwerte *mode* "1", *option* "1", *sampling rate*, *force*.

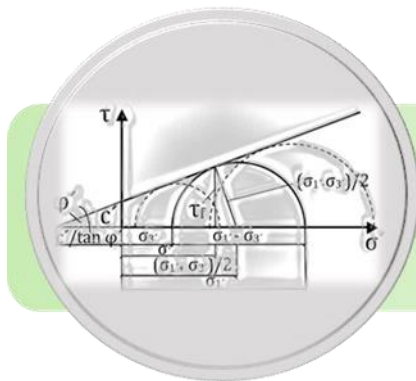
3. Phase 2 (σ_d)

- ELD50: Eingabe *force amplitude*, *frequency*, als letztes *mode* "2"
- ggf. Graph settlement verfolgen: *neues Diagrammfenster öffnen* und *frequency* aus Versuch hineinziehen
- ggf. *force amplitude* nachsteuern

4. Datenauslese

- via *Geräte* von SD Karte
- via Datenexport des ausgewählten Parameters (CSV-Format)

C.4 Grafische Auswertung

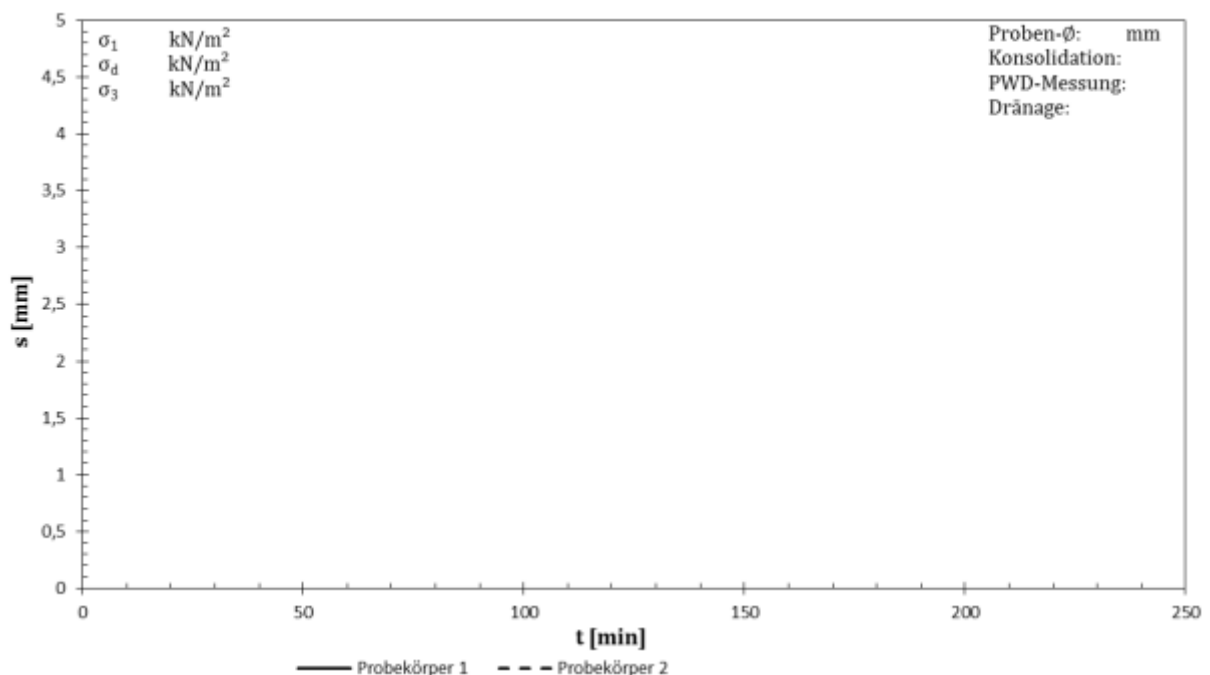


Auswertung Triaxialversuch

Abtastung verschiedener Frequenzen

Grafische Auswertung von Anregungsfrequenzen mit Hilfe von Excel

Setzungskurve unter dynamischer Last

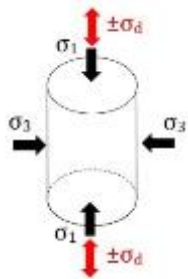


Allgemeine Vorgehensweise:

- **Beispiel Datenauslese für Setzung:** GeoDESC öffnen, *Projekt XY* auswählen, *Versuch XY* auswählen, *ELD50.2:#2163* Gerät auswählen, Rechtsklick auf *settlement*, *Daten importieren/exportieren*, *CSV - Export*, Speicherort wählen.
- CSV-Datenexport in Excel importieren: *Daten, Text in Spalten* (Beachte: Semikolon)
- gewünschte Abschnitte (Zeit anpassen [min], *settlement [mm]*) als Diagramm darstellen, Layout anpassen.

Anhang D: Protokolle Zyklischer CU-Versuch

D.1 Versuchsschema



Vergleichende Betrachtung von Auelehm (TL) und Karlsruher Sand (S) im zyklischen/dynamischen Triaxialversuch

Durchmesser [mm]	50
Höhe [mm]	120

2. Variation von Last- und Umlagerungsspannung

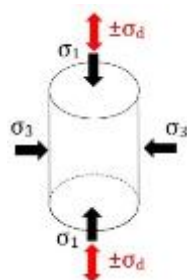
	B1 TL	B2 TL	B3 TL		B4 S	B5 S	B6 S
Axialdruck σ_1 [kN/m ²]	10	20	50		10	20	50
dyn. Auflast σ_d [kN/m ²]	55						
Zelldruck σ_3 [% von σ_1]*	80	50	30		90	70	50
Frequenz f [Hz]	60						

*genauere Festlegung nach Auswertung der Ergebnisse von 1.

Anmerkung: Vorbereitung Versuchsstand, Durchführung und Grafische Auswertung entsprechen Protokoll C.2 bis C.4.

Anhang E: Protokolle Simulation Walzenüberfahrt

E.1 Versuchsschema



Simulation einer Walzenüberfahrt (Bomag BW 211 D-5)

-dynamischer Triaxialversuch-

Durchmesser [mm]	50
Höhe [mm]	120
Konsolidation [h]	2
Tiefe [m]	1,0
Frequenz [Hz]	30

1. Festlegung der manuellen Nachsteuerung am Kunststoffkörper

	<i>force</i>	<i>force</i>	<i>force amplitude</i>	<i>force</i>	<i>force amplitude</i>
σ_3 [kN/m ²]	F_1 [kN]	F_{1Walze} [kN]	F_d [kN]	$(F_1 + F_d)_{soll}$ [kN]	$F_{d,neu}$
10	0,0393*	0,026**	0,728***	0,7933	?

* $\sigma_1 = 20 \text{ kN/m}^2$, $F_1 = 20 \text{ kN/m}^2 * \pi * (0,05 \text{ m})^2 / 4 = 0,0393 \text{ kN}$

** statische Last der Walze: $F_{1Walze} = 5670 \text{ kg} / (0,2 \text{ m} * 2,13 \text{ m}) * \pi * (0,05 \text{ m})^2 / 4000 \text{ kN/N} = 0,026 \text{ kN}$

*** $0,728 \text{ kN} = 158 \text{ kN} / (0,2 \text{ m} * 2,13 \text{ m}) * \pi * (0,05 \text{ m})^2 / 4$

2. Phase 1: Simulation Start der Walze

Walzengeschwindigkeit = 2,5 m/s = 20 m / 30 s, somit werden 10 m vor und 10m nach Walze registriert in 30 s.

	Zeit [min]	σ_3 [kN/m ²]	F_1 [kN]	F_{1Walze} [kN]	ΣF_1	F_d [kN]
Konsolidation	120	10	0,0393	-	0,0393	-
Start Walze	0,5	10	0,0393	0,026	0,0497	0,545***
Pause	5	10	0,0393	-	0,0393	-

*** Nachsteuerung nach 1.

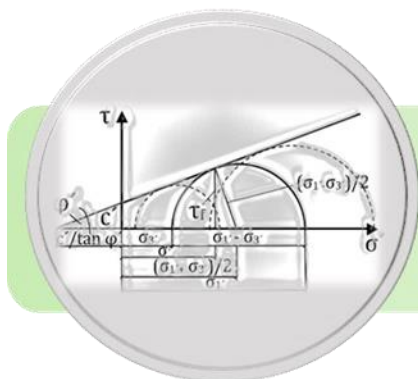
Vorbereitung Versuchsstand, Durchführung und Grafische Auswertung erfolgten nach Anhang C.

3. Phase 2: 5 Überfahrten

axial stress (from press) [kN/m ²]	cell pressure [kN/m ²]	mode	force Amp [kN]	freq [Hz]	sampling Rate [Hz]
20	10	2	0	0	1
57,089	10	2	0,14	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
205,446	10	2	0,7	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
57,089	10	2	0,14	30	250
20	10	2	0	0	1
57,089	10	2	0,14	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
205,446	10	2	0,7	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
57,089	10	2	0,14	30	250
20	10	2	0	0	1
57,089	10	2	0,14	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
205,446	10	2	0,7	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
57,089	10	2	0,14	30	250
20	10	2	0	0	1
57,089	10	2	0,14	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
205,446	10	2	0,7	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
57,089	10	2	0,14	30	250
20	10	2	0	0	1
57,089	10	2	0,14	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
205,446	10	2	0,7	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
57,089	10	2	0,14	30	250
20	10	2	0	0	1
57,089	10	2	0,14	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
205,446	10	2	0,7	30	250
168,3568	10	2	0,57	30	250
131,2676	10	2	0,425	30	250
97,1784	10	2	0,285	30	250
57,089	10	2	0,14	30	250
20	10	2	0	0	1

Vorbereitung Versuchsstand nach Anhang C.2, Durchführung nach Anhang E.2, Grafische Auswertung nach Anhang C.4.

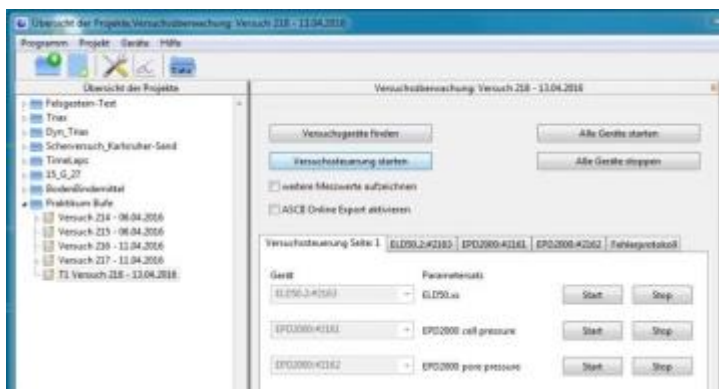
E.2 Durchführung



Versuchssteuerung Triaxialversuch

Simulation Walzenüberfahrt Phase 2

Last geregelter dynamischer Triaxialversuch mittels Excel-Steuerung



1. Projekt einrichten

- Programm GeoDESC öffnen
- neues Projekt und Versuch "Walzenfahrt"
- Geräte auswählen (Zelldruck und Prüfpresse), "Versuchsgeräte finden", "Versuchssteuerung starten"

2. Eingabe in Excel

- Reiter ELSxx wählen
- Durchmesser (sample diameter) und Höhe (height h₀) eintragen
- Eingabe der Werte gemäß Anhang E.1 3. Phase 2: 5 Überfahrten
- Wechseln zu GeoDESC: "alle Geräte starten"

normal / opt		actual	max	
setpoint	7.431	7.431	100.00mm	10.00
speed	0.75	0.75	18.00mm/min	10.00
load	0.61	0.678	50.00kN	10.00
load_max	16.0		50.00kN	10.00
setho_max	42.25		100.00mm	10.00
cutarea		0.000	93.000	10.00
Steuerfoto	1	1.000		

parameter	value	unit	parameter	value	unit
max. vertical load	63076	[kN/m²]	speed set	0.75	[mm/min]
max. displacement	61	[mm]	max. displacement	61	[mm]
height set	139	[mm]	height set	139	[mm]
speed enabling			speed enabling		
cell volume			cell volume		
volume of sample			volume of sample		
actual load			actual load		
act. cell pressure			act. cell pressure		
act. pore pressure			act. pore pressure		

step	Time [min]	axial stress with cell pressure [kN/m²]	axial stress (from press) [kN/m²]	vertical load [kN]	cell pressure [kN/m²]
1	0	0	0	0	0
2	0	99.71	50	0.791873164	10
3	1	149.71	100	0.381746325	30
4	1	199.71	150	0.571619486	50
5	1	49.71	0	0	0
6	1	49.71	0	0	0
7	1	49.71	0	0	0
8	1	49.71	0	0	0
9	1	49.71	0	0	0
10	1	49.71	0	0	0

3. Datenauslese

- via Geräte von SD Karte
- via Datenexport des ausgewählten Parameters (CSV-Format)

Anhang F: Datenblätter

F.1 Rüttelplatten

Frachtangaben in m3

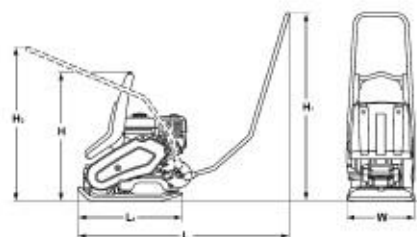
BP 10/35	0,136
BP 12/40	0,167

Standardausrüstung

- Schwingungsgedämpfter Führungsbügel, klappbar
- Abnehmbarer Führungsbügel
- Hochverschleißfeste Grundplatte
- Abschaltautomatik bei Ölmenge
- Reversierstarter
- Allseitig geschützter Keilriemen
- Tragegriffe
- Einpunktaufhängung
- Schutzabdeckung
- 3-2-1 Garantie

Zusatzrüstung

- Wasserberieselung (+10kg)
- Transporträder (+4kg)
- Kunststoffmatte
- Werkzeug
- Sonderlackierung
- Service Kit
- Motorschutzbügel (BP12/40) (+4kg)
- TOUGH WARRANTY
- Komfortbügel



Maße in mm

	H	H1	H2	L	L1	W
BP 10/35	658	962	700	1084	532	350
BP 12/40	658	962	700	1084	542	400

Technische Daten

		BOMAG BP 10/35	BOMAG BP 12/40
Gewichte			
Betriebsgewicht CECE	kg	65	72
Eigengewicht	kg	64	71
Abmessungen			
Arbeitsbreite	mm	350	400
Fahreigenschaften			
Arbeitsgeschwindigkeit max.	m/min	25	25
Max. Steigfähigkeit (bodenabhängig)	%	30	30
Antrieb			
Motorhersteller		Honda	Honda
Typ		GX 120	GX 120
Abgasstufe		CARB Phase III	CARB Phase III
Kühlung		Luft	Luft
Anzahl der Zylinder		1	1
Leistung SAE J 1349	kW	2,6	2,6
Drehzahl	min ⁻¹	3.600	3.600
Antriebsart		mech.	mech.
Kraftstoff		Benzin	Benzin
Kraftstoffverbrauch i.M. bei Betrieb	l/h	0,9	0,9
Erregersystem			
Frequenz	Hz	90	90
Zentrifugalkraft	kN	10	12
Amplitude	mm	1,01	1,03
Füllmengen			
Kraftstoff	l	2,0	2,0
Wasser	l	13,5	13,5

Technische Änderungen vorbehalten. Maschinen können mit Sonderzubehör abgebildet sein.



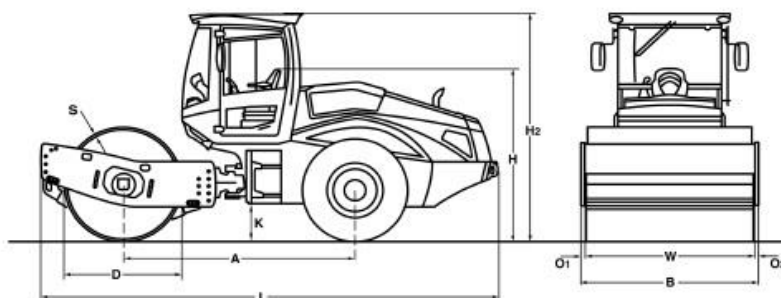
PRD 230 13 010

240216 Sa

BOMAG
Hellerwald
D-58154 Boppard
Postfach 5162
D-58149 Boppard
Tel. (0)6742 - 1000
Fax (0)6742 - 3090



F.2 Walze



Maße in mm

	A	B	D	H	H2	K	L	O1	O2	S	W
BW 211 D-5	2975	2270	1500	2260	2990	490	5870	70	70	25	2130
BW 211 PD-5	2975	2270	1480	2260	2990	490	5870	70	70	25	2130

Technische Daten

		BOMAG BW 211 D-5	BOMAG BW 211 PD-5
Gewichte			
Max. Betriebsgewicht	kg	12.890	12.750
Betriebsgewicht CECE m. ROPS-Kabine	kg	10.600	12.100
Achslast, Bandage CECE	kg	5.670	7.170
Achslast, Räder CECE	kg	4.930	4.930
Statische Linienlast CECE	kg/cm	26,6	
Abmessungen			
Arbeitsbreite	mm	2.130	2.130
Spurkreisradius innen	mm	3.680	3.680
Fahreigenschaften			
Fahrgeschwindigkeit (1)	km/h	0- 5,0	0- 5,0
Fahrgeschwindigkeit (2)	km/h	0- 6,0	0- 6,0
Fahrgeschwindigkeit (3)	km/h	0- 8,0	0- 8,0
Fahrgeschwindigkeit (4)	km/h	0- 11,0	0- 11,0
Max. Steigfähigkeit ohne/mit Vibration	%	51/48	54/51
Antrieb			
Motorhersteller		Deutz	Deutz
Typ		TCD 3.6 L4	TCD 3.6 L4
Abgasstufe		4/4	4/4
Kühlung		Flüssigkeit	Flüssigkeit
Anzahl der Zylinder		4	4
Leistung ISO 3046	kW	95,0	95,0
Leistung SAE J 1995	hp	128,0	128,0
Drehzahl	min-1	2.000	2.000
Kraftstoff		Diesel	Diesel
Elektrische Ausrüstung	V	12	12
Antriebsart		hydrost.	hydrost.
Bandage angetrieben		Serie	Serie
Bandagen und Reifen			
Stampffüße - Anzahl			150
Fläche eines Stampffußes	cm ²		137
Höhe der Stampffüße	mm		100
Reifengröße		23.1-26 12PR	23.1-26 12PR
Bremsen			
Betriebsbremse		hydrost.	hydrost.
Feststellbremse		hydromech.	hydromech.
Lenkung			
Art der Lenkung		Pendel-Knick	Pendel-Knick
Lenkbetätigung		hydrost.	hydrost.
Lenk- / Pendelwinkel +/-	grad	35/12	35/12
Erregersystem			
Antriebsart		hydrost.	hydrost.
Frequenz	Hz	30/34	30/34
Amplitude	mm	1,95/1,00	1,70/0,90
Zentrifugalkraft	kN	240/158	285/194
Zentrifugalkraft	t	24,5/16,1	29,1/19,8
Füllmengen			
Kraftstoff	l	250,0	250,0

Technische Änderungen vorbehalten. Maschinen können mit Sonderzubehör abgebildet sein.

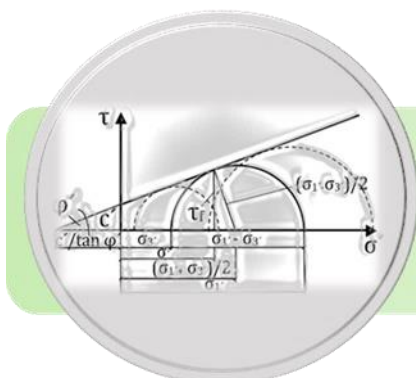
Anhang H: Technische Systemübersicht

Systemübersicht Triaxialanlage

The collage provides a detailed technical overview of the triaxial testing system, organized into several functional areas:

- Control and Data:** Steuergeräte (Control units), GeoDesc (Software interface), and Excel ELSxx (Data processing software).
- Core Testing Equipment:** Prüfpresse (Testing press), Einbau Druckzelle (Pressure cell assembly), and Pneumometer (Pressure gauge).
- Fluid Management:** Entlüftetes Wasser (De-aerated water), Befüllung Druckzelle (Pressure cell filling), Einlauf σ_3 (Inlet σ_3), and Luftventil (Air valve).
- Assembly Components:** Kopfleiste, Kopfstück, Lastsensor, Adapter, Kugel, Sicherungs-ring, and Kopfstempel.
- Sample and Cell Details:** Stangen (Stems), Kopfplatte (Head plate), Gehäuse (Housing), and Probeneinbau UU Versuch (UU sample assembly).
- Accessories and Materials:** Kompressor (Compressor), Gummiringe Filterstein (Rubber rings and filter stone), Kopf und Fußstücke (Head and foot pieces), and Membranen (Membranes).

Anhang I: Protokoll B-Test



B-Test

**Kontrolle Sättigungsvorgang nach DIN 18137-2
(nicht bei UU-Versuchen)**

Der B-Test dient der Kontrolle des Sättigungsvorganges bei statischen (CU-, D-, CCV-Versuch) und dynamischen (CU-, CD- und CW-Versuch) Triaxialversuchen.

Durchführung:

- Dränage schließen,
- Anfangsporenwasserdruck u_0 und Anfangszelldruck $\sigma_{3,0}$ ablesen (an Steuergeräten)
- Zelldruck σ_3 am Steuergerät um 0,1 bis 0,2 $\sigma_{3,0}$ erhöhen (gibt $\Delta\sigma_3$)
- Porenwasserdruck u nimmt dadurch zu (Δu) (ca. 2 min)
- B-Wert = $\Delta u / \Delta\sigma_3 = \frac{(u_1 - u_0)}{(\sigma_{3,1} - \sigma_{3,0})}$



Bezeichnung	Formel	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Anfangsporenwasserdruck	u_0				
Anfangszelldruck	$\sigma_{3,0}$				
Endporenwasserdruck	u_1				
Endzelldruck	$\sigma_{3,1}$				
	B-Wert				

Aus
wer
tun
g:

Eine ausreichende Sättigung ist vorhanden, wenn der B-Wert

≥0,95 für weiche bis steife bindige und nichtbindige Böden ist, oder

≥0,90 für hoch überkonsolidierte, halbfeste bindige Böden ist.

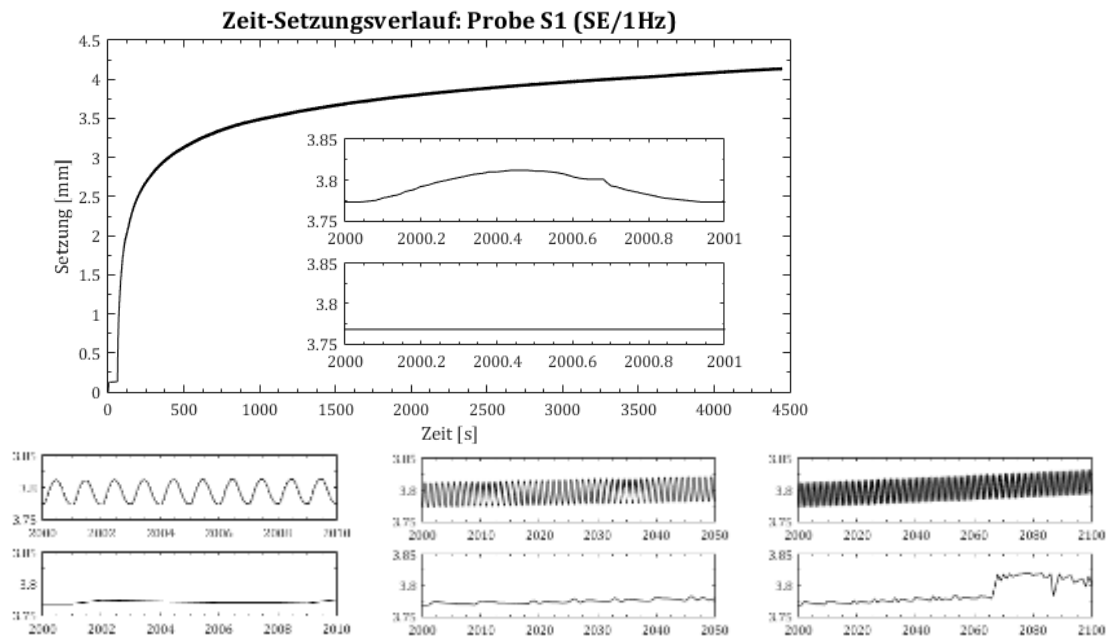
Wenn der B-Wert nicht erreicht wird muss u_0 erhöht werden.

Halbfeste, bindige Böden erreichen oftmals keine ausreichende Sättigung, somit ist der CCV-Versuch dem CU-Versuch vorzuziehen.

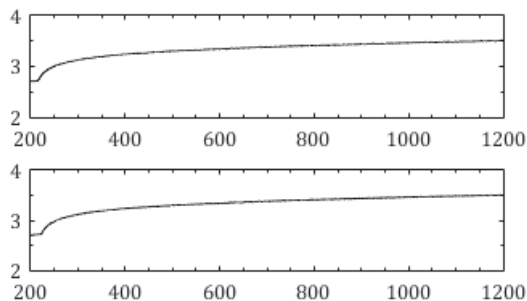
Anhang J: Vergleich der Datenexporte

Setzungen von SE bei 1 und 15 Hz

Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von SE bei 1 Hz mit 1-, 10-, 50- und 100-Sekunden-Fenstern.

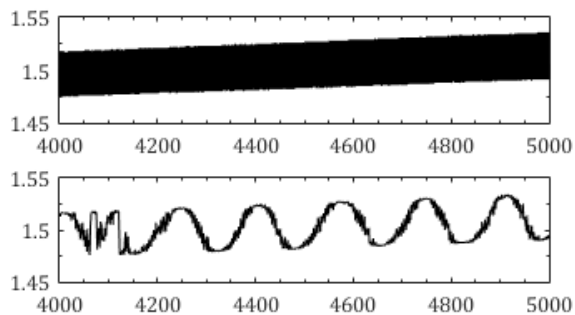


Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von SE bei 15 Hz im 1000-Sekunden-Fenster.

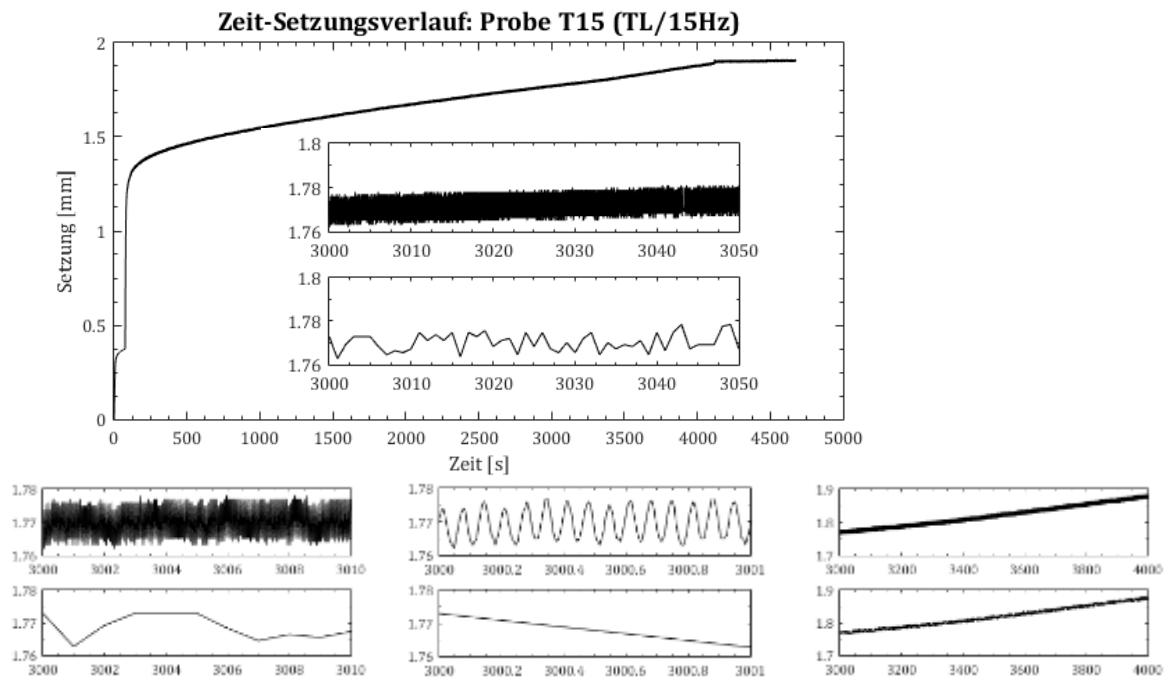


Setzungen von TL bei 1 und 15 Hz

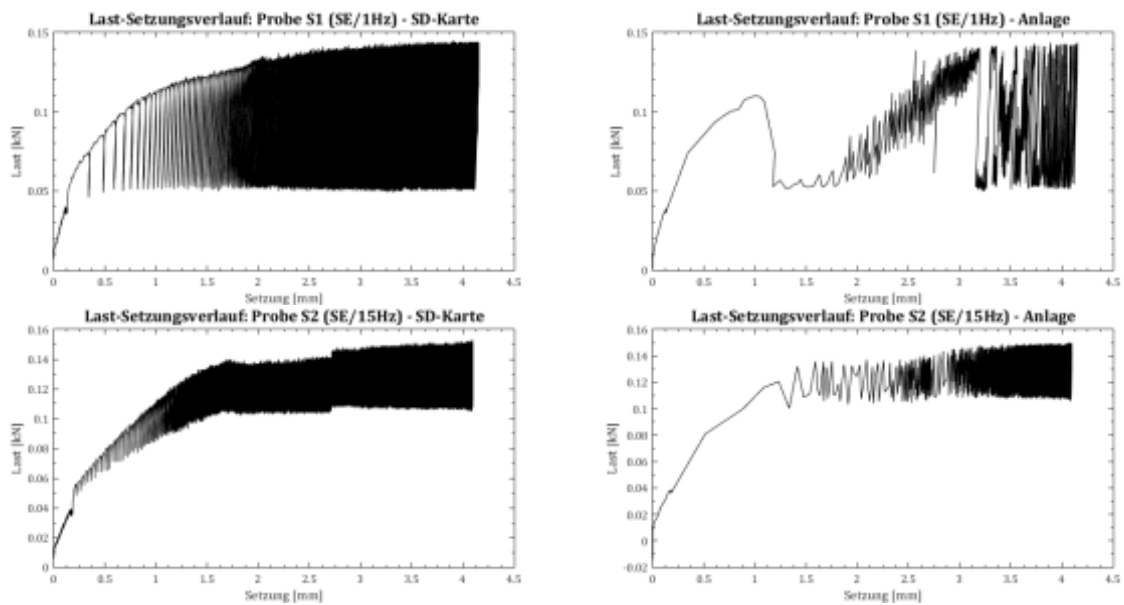
Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von TL bei 1 Hz im 1000-Sekunden-Fenster.



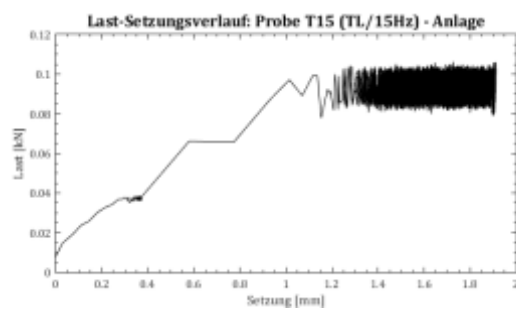
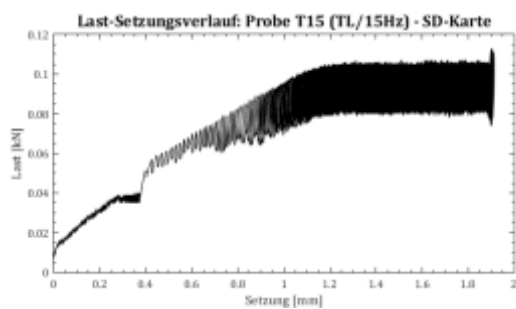
Darstellung des Zeit-Setzungsverlaufes von TL bei 15 Hz mit 1-, 10-, 50- und 1000-Sekunden-Fenstern.



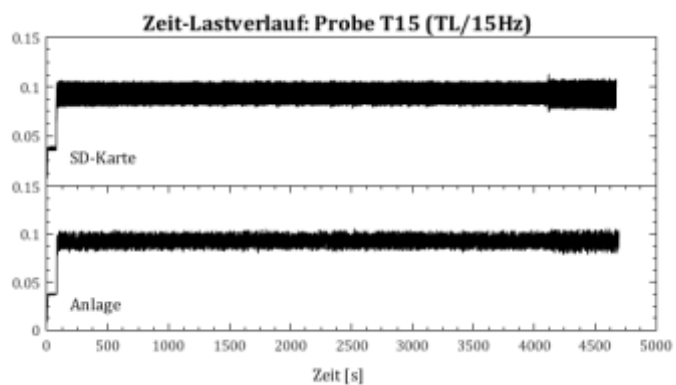
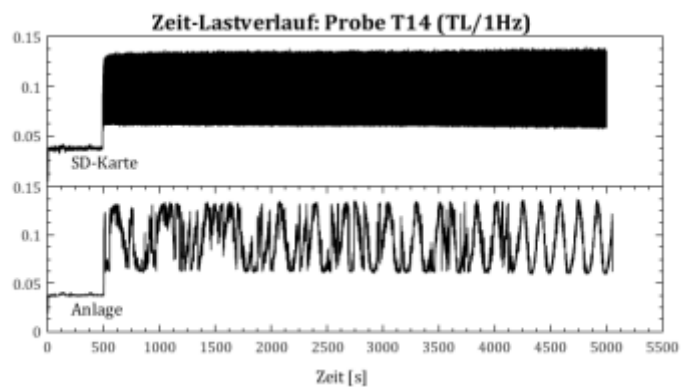
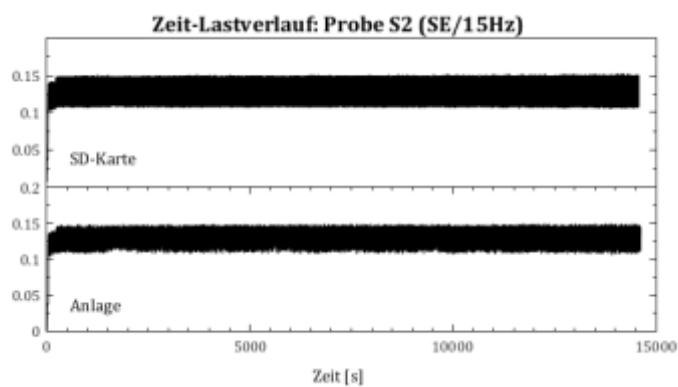
Last-Setzung von SE



Last-Setzung von TL

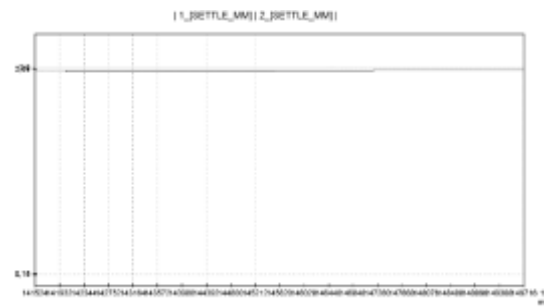
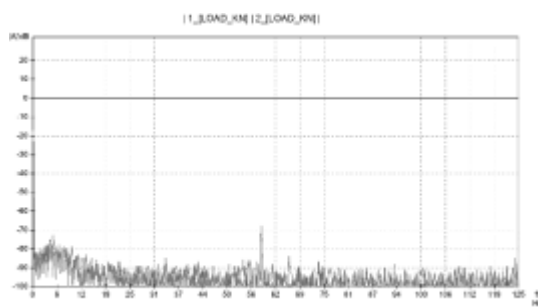
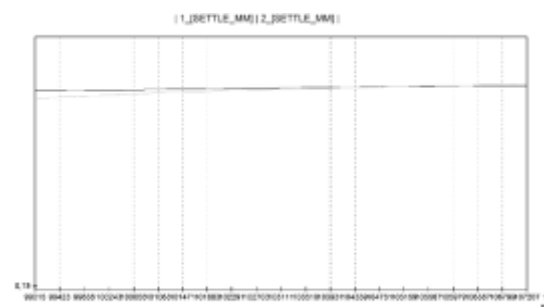
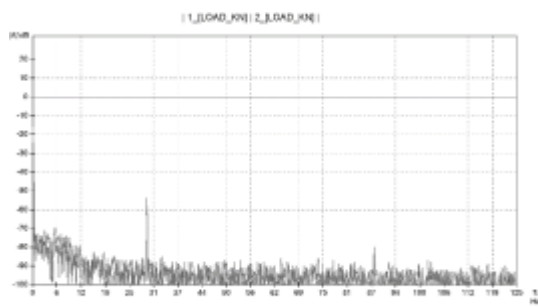
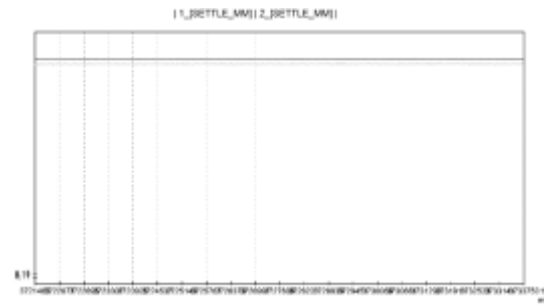
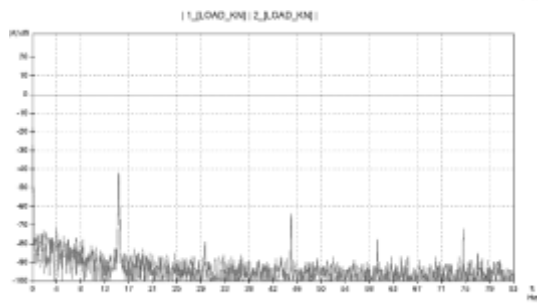
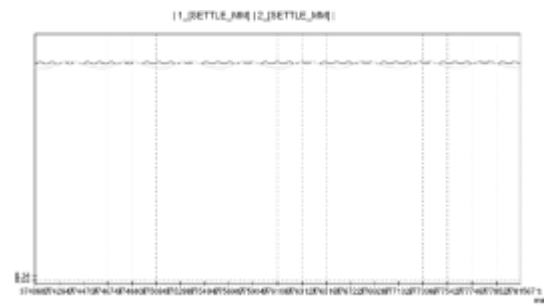
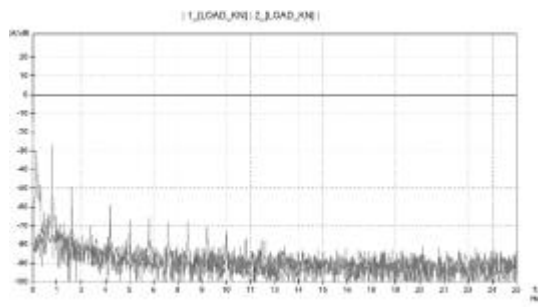


Lastanalyse von SE und TL



Frequenzvergleiche

Load-Frequency	Settle-Time
1 Hz	1 Hz
15 Hz	15 Hz
30 Hz	30 Hz
60 Hz	60 Hz



Glossar

Begriffe nach DIN 18137 und GOST 56353

Abscheren: Letzter Schritt beim Ablauf von Triaxialversuchen, wobei durch Festlegung von Stauchungsgeschwindigkeit σ_1 und Zelldruck σ_3 der Probekörper zum Bruch geführt wird.

Bender-Elemente: Messsystem zur Induktion von Scherwellen in einen Probekörper. Der Empfang des elektrischen Signals lässt eine Beurteilung der Scherwellengeschwindigkeit und somit des maximalen Schermoduls zu.

Deviatorspannung: Differenz von Spannungen. Bei triaxialen Versuchen gilt $\sigma_2 = \sigma_3$, da die Probekörper in Zylinderform vorliegen und somit entspricht die Deviatorspannung bei Triaxialversuchen $\sigma_1 - \sigma_3$.

Dilatanz: Verformung (Dehnung) eines Bodens mit geringer Porenzahl e während des Abschervorganges.

dynamische Dilatanz: Mechanismus der Deformation in Böden unter dynamischer Belastung, bei der eine Volumenänderung aufgrund der Umlagerung und gegenseitigen Verschiebung von Partikeln (abhängig vom Feinkornanteil) oder infolge der Entwicklung von überschüssigem Porendruck (positiv oder negativ) in einem geschlossenen wassergesättigtem System .

dynamische Instabilität des Bodens : Zunahme und Abnahme der Verformbarkeit infolge dynamischer Belastung. (je nach Boden dilatant, dilatant-thixotrop, oder quasi-thixotrop).

dynamische Verdichtung: Flüssigkeiten gesättigter Böden dispergieren infolge der Zerstörung struktureller Verbindungen mit dynamischen Effekten.

effektive Normalspannung σ' : vom Korngerüst getragene Normalspannung ($\sigma' = \sigma - u$).

effektive Schubspannung τ : vom Korngerüst getragene Schubspannung (Wasser überträgt keine Schubspannung, deshalb sind in wassergesättigten Böden die totalen gleich den effektiven Schubspannungen).

Entfestigung: Wenn sich ein Boden über einen bestimmten Grenzzustand hinweg weiter verformt, hat er geringere Schubfestigkeit τ .

Filtersteine: Sie verhindern Austritt von Luft aus der Probe, dienen der Aufnahme von Porenwasser (Dränage) und werden kopf- und fußseitig am Probekörper gelegt. Die Saugspannung gewährleistet Trennung von Luft und Wasser aus Poren.

Gegendruck: notwendiger Druck für Sättigungsphase (vor Konsolidation und Abscheren), unter Fachleuten oftmals auch als **Backpressure** bezeichnet.

Grenzzustand: Spannungen und Dehnungen der Bodenprobe erreichen maximal mögliche Werte.

Grenzzustand größter Scherfestigkeit: Mit einer geringen Porenzahl e und unbehinderter Radialdehnung können die größten Scherwiderstände gemessen werden.

isotroper (mittlerer) Druck: totaler, effektiver Druck $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $p' = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$

K0-Test: Versuch mit verhinderter Radialausdehnung (Oedometerversuch ohne Wandreibung). Der K0-Test entspricht einem Oedometerversuch (Last-Setzungs-Versuch) und liefert Materialparameter für teilgesättigte Böden, die notwendig sind um in Kombination mit einem Triaxialversuch die Spannungs- und Verformungseigenschaften zu beurteilen.

Hall-Sensor, Hall-Effect-Sensor: Dienen der lokalen Messung von Magnetfeldern, Belastungen und Steifigkeiten an Probekörpern.

Hysteresis (Hysterese): In der Bodendynamik vorkommendes Phänomen bei dem unter dynamischer Belastung, abhängig vom Feinkornanteil und Porendruck, sogenannte Hystereseschleifen entstehen. Es handelt sich um einen Effekt der verlorenen Arbeit während einer Verdichtung, denn infolge der Bodeneigenschaften ist zusätzliche Belastungsarbeit nach jeder Belastung notwendig um den Boden aus der elastischen in die plastische Verformung zurückzuführen.

Kapillarkohäsion c_c : Eigenschaft (Spannungen) der Grenzfläche Luft-Wasser bei teilgesättigten Böden.

Kohäsion c bzw. c' : Ordinatenabschnitt im (τ, σ) - bzw. (τ, σ') -Diagramm. Porenzahl, hydraulische Gegebenheiten und Konsolidationsgrad bestimmen die Kohäsion der Probe. Verkittung, Gefügefestigkeit und Kapillarspannungen können darauf Einfluss haben.

Kohäsionskonstanten λ_{cs} und λ_c : Zwischen c' und Konsolidationsspannung $\max \sigma'$ bzw. $\max \sigma_v'$ herrscht ein linearer Zusammenhang. Es gilt: $c' = \lambda_{cs} \cdot \max \sigma'$ bzw. $c' = \lambda_c \cdot \max \sigma_v'$

Konsolidation (Schwellung): Änderung der Porenzahl e (Porenanteil n) im Boden infolge der Änderung der Spannungen. Schwellung ist die Zunahme von e . Befindet sich eine Probe im gesättigten Zustand erfolgt die Konsolidation (Schwellung) durch Aufbringen (Verringern) von Zelldruck bzw. axialem Druck. Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf den Porenwasserdruck.

Konsolidation, isotrope: Zelldruck und axialer Druck werden gleichmäßig aufgebracht ($\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3'$).

Konsolidation, anisotrope: es gilt $\sigma_1' \neq \sigma_2'$, $\sigma_2' \neq \sigma_3'$, oder $\sigma_3' \neq \sigma_1'$

Konsolidation, eindimensionale: Vergleichbar mit einem einaxialen Kompressionsversuch erfolgt das Aufbringen einer effektiven Spannung σ'_1 (axial), wobei Radialdehnung gemessen und durch aufbringen von Zelldruck verhindert wird.

Konsolidation, normalkonsolidiert: Wirkte bisher nie ein besonderer Spannungszustand auf den Probekörper ist dieser normalkonsolidiert (Vergleichsspannung $\sigma'_v = \sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$).

Konsolidation, überkonsolidiert: Vor der Probenentnahme erfuhr der Boden einen Spannungszustand größer als σ'_v .

Konsolidation, eindimensional normalkonsolidiert: wenn bisher $\sigma'_1 > \sigma'_v$, $\sigma'_2 > \sigma'_v$ oder $\sigma'_3 > \sigma'_v$ nie vorkam, dann ist der Probekörper in der jeweiligen Komponente eindimensional normalkonsolidiert.

Konsolidation, eindimensional überkonsolidiert: wenn bisher $\sigma'_1 > \sigma'_v$, $\sigma'_2 > \sigma'_v$ oder $\sigma'_3 > \sigma'_v$ vorkam, dann ist der Probekörper in der jeweiligen Komponente eindimensional überkonsolidiert.

Konsolidationsspannung: σ'_1 , σ'_2 , σ'_3 (effektive Spannung) die verwendet wird um den Probekörper zu konsolidieren.

Kontraktanz: Zusammenschrumpfen (Kontraktionsfähigkeit) eines Bodens, während des Abschervorganges, wegen zu großem Porenraums (Porenzahl e).

kritischer Grenzzustand (kritischer Zustand): Eine bestimmte, gesuchte Spannung auf den Probekörper verursacht konstante Verformungen und das Erreichen der kritischen Porenzahl e_k .

kritische Porenzahl e_k : Porenzahl im kritischen Zustand. Das Kompressionsverhalten eines Bodens wird maßgeblich durch den Porenraum gekennzeichnet. Dieser Sachverhalt ist messtechnisch und zum modellhaften Denken nicht nur für gesättigte, sondern vor allem für teilgesättigte Probekörper von immenser Wichtigkeit.

Liquefaktion: Bodenverflüssigung ist ein Phänomen zyklischer Belastungen, bei dem aufgrund äußerer Spannungen und verhinderter Volumenausdehnung, der Porenwasserdruck ansteigt und die Druckkräfte im Korngerüst abnehmen. Da der Boden im Prinzip nicht in der Lage ist sich zu „setzen“, sind im Versagenszustand die äußeren Spannungen so groß, dass im Korngerüst keine Druckkräfte mehr vorhanden sind und somit kein Scherwiderstand mehr aufgebracht werden kann.

P-Wellen: Seismische Primärwellen, Verdichtungswellen, deren Betrachtung relevant wird bei Triaxialversuchen zur Erdbebensicherheit.

plastisches Versagen: starke Verformung des Probekörpers. Wenn Probe in einem bestimmten Bereich bricht nennt man dies auch Zonenbruch.

Porenwasserdruck u : Druck des freien Porenwassers innerhalb einer Bodenprobe. In Triaxialversuchen oftmals auch als u_{Kopf} - und $u_{\text{Fuß}}$ -Ventile gekennzeichnet, welche das innere Drucksystem darstellen (äußeres wäre in diesem Fall der Zelldruck σ_3).

überkritisch bzw. unterkritisch dichter Boden: Durch Konsolidation kann jeglicher verdichteter Zustand von Böden simuliert werden. Weichen die Porenzahlen eines Probekörpers unter einem bestimmten Spannungszustand von der kritischen Porenzahl e_k ab, so spricht man von über- oder unterkritisch dichtem Boden.

RC-Gerät, Resonanzsäule: Laborversuch zur Beurteilung von Materialdämpfung und dynamischen Deformationsmodul.

Reibungswinkel φ bzw. φ' : Neigungswinkel der Gerade die die Spannungskreise (τ , σ - bzw. τ , σ' -Diagramm, wenn $u=0$, dann $\varphi=\varphi'$) tangiert.

Rekonsolidation: Konsolidation im Scherversuch unter einer Vergleichsspannung σ'_v , die im Baugrund vor der Probenentnahme geherrscht hat.

Restscherfestigkeit (Gleitfestigkeit) τ_R : Scherfestigkeit nach Abschervorgang, die im Bereich der Scherfuge herrscht.

S-Wellen: Seismische Sekundärwellen, Scherwellen, deren Frequenz und Amplitude für komplexere triaxiale Untersuchungen im Gebiet Erdbebensicherheit relevant werden.

Scherfestigkeit τ_f : in einer Scherfuge im Grenzzustand auftretende Schubspannung.

Scherfuge: Oft erst nach Probenausbau sichtbarer Bereich, meist im mittleren Drittel des Bodenkörpers, in dem durch Spannungen verursachte Verformungen zum plastischen Versagen führen.

Scherparameter: Kohäsion c' und Reibungswinkel φ' (ermittelt aus σ_1 und σ_3).

Scherversuch: Untersuchung der Wirkung von axialen/triaxialen Spannungen oder/und Verschiebungen auf eine Bodenprobe im Labor (Direkter Scherversuch, Triaxialversuch).

Spannungspfad: Darstellung von Spannungen (σ , σ') und der dazugehörigen Stauchung/Dehnung (ε) um die oft visuell nicht sichtbaren Vorgänge bei Scherversuchen grafisch zu verdeutlichen. Dabei empfiehlt sich, wie bei einigen anderen grafischen Darstellungen von Triaxialversuchen, die Überlagerung von Diagrammen. Hier wäre beispielsweise die Einbindung von Zeitkomponente oder Laststufe möglich.

Schubwiderstand, Scherwiderstand: Widerstandsfähigkeit eines Probekörpers gegen axiale/triaxiale Beanspruchungen (Spannungen).

totale Normalspannungen σ : vom Porenwasser und Korngerüst aufgenommene Normalspannung ($\sigma'=\sigma$ wenn Boden wasserungesättigt).

totale Scherparameter: c_u (Kohäsion) und φ_u (Reibungswinkel) können mithilfe von UU-Versuchen ermittelt werden.

ungestörte Bodenprobe: Güteklasse 1 nach DIN EN 1997-2.

Verfestigung: Das Gefüge im Boden verformt sich derartig, dass viel größere Schubfestigkeiten τ aufgebracht werden können.

Vorschubgeschwindigkeit: Auch Stauchungsgeschwindigkeit genannt, bezeichnet ein von der Plastizitätszahl I_p abhängiges, steuerungstechnisch relevantes Aufbringen von Normalspannungen auf den Probekörper: I_p (<10% mit 0,010 mm/min, 10-25 mit 0,005, 25-50 mit 0,002, >50 mit 0,001 für D-Versuche; für CU-Versuche 10x höher; für UU-Versuche: $\dot{\epsilon}_1 \approx 1\%$ je min).

Zonenbruch: plastisches Versagen unter kontinuierlicher Verformung einer räumlichen Zone.

Zellendruck: Bei Triaxialversuchen die kleinere Hauptspannung oder Zellendruck σ_3 . Oft wird dieser Zellendruck auch als $\sigma_{2,3}$ bezeichnet, was eigentlich fachlich richtig ist, da aber zylindrische Proben getestet werden ist die Bezeichnung σ_3 praktikabler und kommt häufiger in der Literatur vor.

Literaturverzeichnis

geomatics. Abgerufen am 31.03.2016 von <http://www.geomatics.de/de/triaxialversuch>.

bomag. Abgerufen am 13.06.2016 von <http://www.bomag.com/de/de/produkte.htm>.

Bassem, Soumaya (2005). Setzungsverhalten von Flachgründungen in normalkonsolidierten bindigen Böden. Schriftenreihe Geotechnik. Universität Kassel.

Becker, Thomas (2012). Materialverhalten eines teilgesättigten bindigen Bodens unter zyklischer Belastung. Technische Universität Kaiserslautern.

Gilbert, Paul A. (1984). Investigation of density variation in triaxial test specimens of cohesionless soil subjected to cyclic and monotonic loading. Final Report. Department of the Army. Waterways Experiment Station. Vicksburg.

Haupt, Wolfgang (1986). Bodendynamik. Grundbauinstitut LGA Bayern Nürnberg. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. Braunschweig.

Hornig, Ernst-Dieter (2007). Spannungs-Verformungsverhalten von wechselfestem Gestein. TU Bergakademie Freiberg. Institut für Geotechnik.

Internes Bodenmechanisches Datenblatt zum Versuchsmaterial "Karlsruher Sand". G² Gruppe Geotechnik. TCDyn.

Kolymbas, D. (2007). Geotechnik Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau (2. Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Universität Innsbruck.

Möller, Gerd (2013). Geotechnik Bodenmechanik Bauingenieur-Praxis (2. Auflage). Ernst & Sohn.

Okubo, S. (2007). Development of a transparent triaxial cell and observation of rock deformation in compression and creep tests. Department of Geosystem Engineering. University of Tokyo.

Rees, Sean (2013). What is Triaxial Testing? Part one: Introduction to Triaxial Testing. GDS Instruments.

Rees, Sean (2013). What is Triaxial Testing? Part two: Advanced Triaxial Testing. GDS Instruments.

Rees, Sean (2013). What is Triaxial Testing? Part three: Dynamic Triaxial Testing. GDS Instruments.

Rütz, D. (2011). Wissensspeicher Geotechnik (18.Auflage). Bauhaus-Universität Weimar. Eigenverlag Geotechnik Weimar.

Simmer, K. Grundbau 1: Bodenmechanik, Erdstatische Berechnungen. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH(18. Auflage).

Studer, Laue, Koller (2007). Bodendynamik. Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ETH Zürich.

DIN 18135 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch.

DIN 18137-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 1: Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen.

DIN 18137-2 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch.

DIN 18137-2 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch.

DIN 18196 Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

DIN EN ISO 17892-5 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuch an Bodenproben – Teil 5: Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung.

DIN ISO/TS 17892-8 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Unkonsolidierter undrännierter Triaxialversuch.

DIN ISO/TS 17892-9 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden.

GOST R 56353 ГРУНТЫ. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. (2015).

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort