



Bettina Radinger, BSc

**Tragfähigkeitsuntersuchungen und In-situ-Dichtebestimmungen  
im Erdbau mit österreichweitem Rundversuch zwecks  
Vergleichsversuchen an einem Probefeld**

**DIPLOMARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium - Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

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

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

Zweitbetreuer

Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Graz, Oktober 2018



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Diplomarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte für die sehr lehrreichen und spannenden Vorlesungen in den Fächern Bodenmechanik und Geotechnik, welche mich dazu bewegten, dieses Fachgebiet zu vertiefen.

Ein weiterer besonderer Dank gilt meinem Betreuer dieser Arbeit Herrn Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz für die kompetente Unterstützung bei der Verfassung der vorliegenden Masterarbeit und die zahlreichen Fachdiskussionen.

Weiters möchte ich mich bei allen Beteiligten an den Laborantentagen und der Auswertung dieser für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während des gesamten Studiums und darüber hinaus unterstützt haben und stets zu mir gestanden sind. Ohne sie wäre es nicht möglich gewesen, dass ich mein Studium absolvieren kann. Außerdem möchte ich ihnen danken, dass sie mir ermöglichten mein Studium für den Volontariatseinsatz in Malawi zu unterbrechen. Nur so konnte ich diese unvergessliche und sehr bereichernde Zeit im Ausland erleben.

Ein Dank gilt auch meinem Bruder Markus, der mir über das ganze Studium hindurch stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiters bedanke ich mich bei meinen Kollegen und Freunden beim Roten Kreuz Hartkirchen für den guten Ausgleich zu meinem Studium und die schönen Stunden im Dienst und in der Freizeit.

Ein großer Dank gebührt meinen Studienkollegen und Freunden, ganz besonders Marie und Jacqueline, die mich durch alle Höhen und Tiefen meiner Studienzeit begleitet haben und mich in jeder Lebenslage unterstützen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Kollegen des Stahlbauzeichensaals, für die unzähligen gemeinsamen Stunden im Zeichensaal und die Aktivitäten abseits des Studiums bedanken.

Graz, im Oktober 2018

Bettina Radinger, BSc



# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Präzision und Genauigkeiten von Versuchen zur Tragfähigkeitsuntersuchung und In-situ-Dichtebestimmung untersucht. Für die Bestimmung der Tragfähigkeit werden der dynamische und der statische Lastplattenversuch herangezogen. Zur In-Situ-Dichtebestimmung kommen diverse Ersatzverfahren und das radiometrische Verfahren mittels Troxler Isotopsonde zur Anwendung. Bei der Planung und Abwicklung der Versuche wurde auf eine normgerechte Durchführung geachtet.

Außerdem wird die praktische Anwendbarkeit der Photogrammetrie zur Volumensbestimmung einer Prüfgrube untersucht. Dieses neuartige Verfahren wird als „Smart Density Determination“ benannt.

Nach Auswahl der Versuche und Planung der Abläufe auf einem Probefeld und der Planung des Aufbaues dieses, wurden im Zuge der Erdbaulaborantentage 2018 geotechnische Labors aus Österreich für die Durchführung dieser Versuche eingeladen.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Auswertung der Ergebnisse des Vorversuches flossen in die Planung des Hauptversuches. So wurde versucht mögliche Einflussfaktoren zu verringern.

Nach Auswertung des Hauptversuchs zeichnet sich ab, dass die Versuche der Tragfähigkeitsbestimmung nur bedingt vergleichbar sind und auf eine Anisotropie im Probefeld hinweisen. Die Versuche der In-situ-Dichtebestimmung zeigen gute Übereinstimmungen und lassen auf ein homogenes Probefeld schließen.

Für die Anwendbarkeit der Smart Density Determination müssen weitere Vergleichsmessungen getätigt werden. Das System ist sehr vielversprechend und kann mit den laufenden Verbesserungen der Technik sehr effektiv eingesetzt werden.



# Abstract

The present master's thesis investigates the precision and accuracy of geotechnical testing and soil investigation field methods. The compaction control is performed by means of light falling weight device and static load plate test. For soil density determination the substitution methods and the radiometric testing with the so called "Troxler Isotopensonde" are probed. Considering the guidelines, the planning and performing of the investigation is done.

Additionally, the practical applicability of the theory of photogrammetry for the determination of the investigation pit volume, named "Smart Density Determination", is probed.

Firstly, the investigation field was planned and for comparison geotechnical laboratories were invited to perform the testing.

Secondly, the analyse of the results is done. The won knowledge of this first investigation field results are used to improve the planning for the second investigation field. Therefore, influencing factors may be decreased.

The result analyse shows high scattering of the load compaction testing results and anisotropic behaviour of the investigation field. Comparison of the density determinations the results show a good correlation and show a homogenous investigation field.

For applicability of the "Smart Density Determination" more comparison probes have to be performed. The system seems to be very efficient and can be performed with the everyday improving technical devices.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung der erforderlichen Prüfungen</b>	<b>2</b>
2.1	Statischer Lastplattenversuch (vgl. ÖNORM B4417: 2018)	2
2.2	Dynamische Lastplattenversuch (vgl. RVS 08.03.04: 2008)	5
2.3	Troxler Isotopsonde – Einstichsonde (vgl. TP-BF-StB, Teil B 4.3: 1999)	8
2.4	Bestimmung der Dichte des Bodens (Vgl. ÖNORM B 4414 Teil 2: 1979)	10
2.4.1	Flüssigkeitsersatz-Verfahren (Vgl. ÖNORM B 4414-2: 1979)	11
2.4.2	Sandersatz-Verfahren (Vgl. ÖNORM B 4414-2: 1979)	13
2.4.3	Stahlkugellersatzverfahren (Vgl. Ahmetovic, 2015)	15
2.5	Smart Density Determination	18
2.5.1	Photogrammetrie (vgl. Schwidefsky und Ackermann , 1976)	18
2.5.2	Volumensbestimmung mittels SDD	19
2.6	Bestimmung des Wassergehaltes (Vgl. ÖNORM EN ISO 17892-1: 2015) 21	
<b>3</b>	<b>Österreichweiter Rundversuch</b>	<b>23</b>
3.1	Teilnehmende Labors	23
3.2	Vorversuch	25

3.3	Aufbau des Probefeldes (Vorversuch)	25
3.4	Versuchsordnung (Vorversuch)	25
3.5	Ablaufkonzept der Versuche (Vorversuch)	28
3.6	Anmerkungen zur Durchführung (Vorversuch)	28
3.7	Problematik und Erkenntnisse (Vorversuch)	31
3.8	Aufbau des Probefeldes (Hauptversuch)	31
3.9	Versuchsordnung (Hauptversuch)	32
3.10	Anmerkungen zur Durchführung (Hauptversuch)	34
<b>4</b>	<b>Statistische Auswertung der Prüfergebnisse</b>	<b>36</b>
4.1	Shapiro-Wilk-Test (vgl. R Documentation)	36
4.2	Ausreißertest nach Grubbs (vgl. R Documentation)	36
4.3	Dichtefunktion (vgl. Silverman, 2002)	37
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>39</b>
5.1	Statischer Lastplattenversuch	40
5.1.1	Vorversuch	40
5.1.2	Hauptversuch	43
5.2	Dynamischer Lastplattenversuch	49
5.2.1	Vorversuch	49
5.2.2	Hauptversuch	50

5.3	Korrelation Statische und Dynamische Lastplatte	52
5.3.1	Vorversuch	52
5.3.2	Hauptversuch	53
5.4	In-situ-Dichtebestimmung mit Troxler Isotopensonde	54
5.4.1	Vorversuch	54
5.4.2	Hauptversuch	57
5.5	In-situ-Dichtebestimmung mittels Ersatzverfahren	63
5.5.1	Vorversuch	63
5.5.2	Hauptversuch	66
5.6	Korrelation Dichtebestimmung	72
5.6.1	Vorversuch	72
5.6.2	Hauptversuch	75
5.7	Korrelation Volumensbestimmung	78
5.7.1	Vorversuch	78
5.7.2	Hauptversuch	80
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>	<b>83</b>
6.1	Tragfähigkeitsuntersuchung	83
6.2	In-situ-Dichtebestimmung	85
6.3	Volumensbestimmung	87

<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Anhangsverzeichnis</b>	<b>91</b>

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Große Buchstaben

$A_0$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche der Öffnung in der Aluminium – Grundplatte
$D$	[cm]	Durchmesser
$D_p$	[cm]	Dicke der Aluminium – Grundplatte
$D_{Pr}$	[%]	Verdichtungsgrad
$E_v$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul
$E_{vd}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Dynamischer Verformungsmodul
$E_{vd\ m}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	gemessener Dynamischer Verformungsmodul
$E_{v1}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Erstbelastungsmodul des statischen Lastplattenversuches
$E_{v2}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Zweitbelastungsmodul des statischen Lastplattenversuches
FSV		Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr
$H_0$		Nullhypothese
$H_1$		Alternativhypothese
LKW		Lastkraftwagen
$M$	[g]	Masse
RVS		Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
$\Delta V_w$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumensdifferenz
$V$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Probe bzw. Prüfgrube
$V_{Ki}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der verbleibenden Stahlkugeln im Messzylinder nach der Füllung in die Prüfgrube
$V_w$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Nullmessung
$V_w'$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen nach Probeentnahme
$V_{Zi}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Stahlkugeln im Messzylinder vor der Füllung in die Prüfgrube

## Kleine Buchstaben

$c$	[-]	Kammerkonstante
$d$	[mm]	Durchmesser der Lastplatte
$d_{GK}$	[mm]	Größtkorndurchmesser
$d_i$	[mm]	Innendurchmesser
$\Delta h_w$	[cm]	Differenz der Flüssigkeitsspiegel
$h_{wn}$	[cm]	Höhe Flüssigkeitsspiegel der Nullmessung
$h_{wn}'$	[cm]	Höhe Flüssigkeitsspiegel nach Probeentnahme
$m$	[g]	Masse der feuchten Probe
$m_1$	[g]	Masse der feuchten Probe mit Prüfbehälter
$m_2$	[g]	Masse der trockenen Probe mit Prüfbehälter
$m_3$	[g]	Masse Trichter mit Prüfsand vor dem Versuch
$m_3'$	[g]	Masse Trichter mit Prüfsand nach dem Versuch
$m_c$	[g]	Masse des Prüfbehälters

$m_d$	[g]	Masse der trockenen Bodenbestandteile
$m_g$	[g]	Masse verbrauchter Prüfsand
$m_w$	[g]	Masse des freien Wassers
$p$		Signifikanz
$r$	[m]	Radius der Lastplatte
$\Delta s$	[0,01 mm]	Setzungsdifferenz
$s_1$	[0,01 mm]	zur unteren Normalspannung zugehörige Setzung
$s_2$	[0,01 mm]	zur oberen Normalspannung zugehörige Setzung
$s_{imax}$	[mm]	gemessene Maximalsetzung
$s_{max}$	[mm]	Mittelwert der Maximalsetzungen
$w$	[M-%]	Wassergehalt

### Griechische Buchstaben

$\rho_E$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Schüttdichte
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte
$\Delta\sigma$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Spannungsdifferenz
$\sigma_{max}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Maximum der mittleren Bodenspannung
$\sigma_0$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Vorbelastung statischer Lastplattenversuch
$\sigma_1$	[MN/m <sup>2</sup> ]	untere Normalspannung
$\sigma_2$	[MN/m <sup>2</sup> ]	obere Normalspannung

# 1 Einleitung

Für die Herstellung von Tragschichten wird die Tragfähigkeit und Dichte des Materials sowohl in situ als auch im Labor mit unterschiedlichen Versuchen ermittelt.

In der praktischen Anwendung dieser genormten Versuche stellt sich jedoch die Frage wie präzise und genau die Ergebnisse die Realität abbilden. Durch diverse Einflussfaktoren wie z.B. Inhomogenität oder Anisotropie des Bodens oder des Schüttguts, Temperatur und Witterung kann es zu Abweichungen in den Ergebnissen kommen.

In den RVS werden die Verdichtungsanforderungen der unterschiedlichen Tragschichten im Erdbau vorgeschlagen (siehe Zitat RVS 08.03.01 und Tab. 1). Die dort angeführten und in der Praxis verwendeten Versuche sollen durch einen österreichweiten Rundversuch auf ihre Präzision und Genauigkeit untersucht werden.

## Verdichtungsanforderungen (RVS 08.03.01)

„Untergrund und Schüttungen sind so zu verdichten, dass mindestens der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  oder der statische Verformungsmodul  $E_{v1}$  oder der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  gemäß Tabelle 1 erreicht werden...“

**Tab. 1:** Mindestanforderungen für nicht bindige Böden an die Verdichtung im Erdbau  
(Auszug aus Tabelle 1, RVS 08.03.01)

<b>Tiefenbereich</b>	<b><math>E_{vd}</math> [MN/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>E_{v1}</math> [MN/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Unterbauplanum</b>	38	35
<b>ab 1 m unter Unterbauplanum</b>	24	20
<b>ab Dammaufstandsfläche (einschl. Bodenauswechslung)</b>	18	15
<b>Hinterfüllung</b>	38	35

## 2 Beschreibung der erforderlichen Prüfungen

### Auswahl des Prüfverfahrens (RVS 08.03.01)

„Für die Überprüfung der Verdichtung sind wahlweise der dynamische Lastplattenversuch, der statische Lastplattenversuch oder die Bestimmung der Dichte im Feld heranzuziehen. Dem dynamischen Lastplattenversuch ist der Vorzug zu geben.“

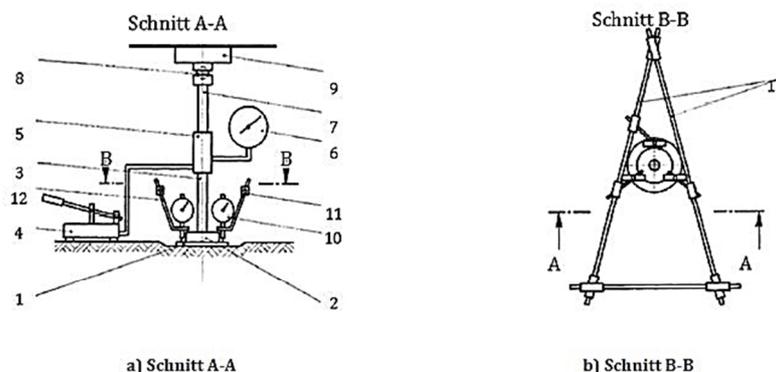
Die im Zitat genannten Versuche werden in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

### 2.1 Statischer Lastplattenversuch (vgl. ÖNORM B4417: 2018)

#### Gerätebeschreibung und Versuchsbedingungen

Der statische Lastplattenversuch ist für grobkörnige, gemischtkörnige und weiche bis feste feinkörnige Bodenschichten geeignet. Dabei ist darauf zu achten, dass der verwendete Lastplattendurchmesser mindestens dreimal so groß, wie das Größtkorn der zu prüfenden Schichte ist. Die Einwirktiefe der Statischen Lastplatte beschränkt sich auf etwa den ein- bis zweifach Plattendurchmesser.

Die Durchführung des statischen Lastplattenversuchs kann mittels Einuhr- oder Dreiuhr-Lastplattengerät getätigt werden (siehe Abb. 1, Beispiel Dreiuhr-Gerät).



#### Legende:

1	Lastplatte	7	Verlängerungsstempel
2	Versteifungsplatte	8	Gelenklager
3	Druckstempel	9	Gegengewicht
4	Pumpe	10	Messuhr
5	Presse	11	Messbrücke
6	Manometer	12	Messuhrhalter

Abb. 1: Dreiuhr-Lastplattengerät (ÖNORM B 4417: 2018)

Bei der Durchführung mittels Einuhr-Gerät muss eine Umrechnung der Setzungen mit dem Hebelarmverhältnis berücksichtigt werden.

Der Untergrund vor dem Aufsetzen der Lastplatte muss eben und waagrecht hergestellt werden. Zum Ausgleichen von Unebenheiten darf ein Normsand aufgebracht werden.

Das verwendete Gegengewicht z.B. beladener Lastkraftwagen muss etwa um 10 kN schwerer als die zu prüfende Höchstbelastung sein. Beim Versuchsaufbau ist darauf zu achten, dass ein Mindestabstand zwischen der Lastplatte bzw. den Auflagerpunkten der Messbrücke und der Aufstandsfläche des Gegengewichtes von  $2d$  nicht unterschritten wird.

### Versuchsdurchführung

Um einen Kraftschluss zwischen Lastplatte und Boden herzustellen, wird eine Vorbelastung  $\sigma_0$  von  $0,02 \text{ MN/m}^2$  aufgebracht. Nach der Vorbelastung werden die Messuhren auf null gestellt.

Je nach Anwendungsbereich werden unterschiedliche Laststufen verwendet. Zur Vereinfachung wird an dieser Stelle nur die zur Anwendung kommenden Laststufen für ungebundene Tragschichten für eine Lastplatte mit einem Durchmesser  $d = 300 \text{ mm}$  angeführt. Weitere Laststufen können der ÖNORM B4417 entnommen werden.

**Tab. 2:** Laststufen statischer Lastplattenversuch bei ungebundenen Tragschichten

Lastzyklen	Laststufe 1	Laststufe 2	Laststufe 3	Laststufe 4	Laststufe 5	Laststufe 6
	$\text{MN/m}^2$	$\text{MN/m}^2$	$\text{MN/m}^2$	$\text{MN/m}^2$	$\text{MN/m}^2$	$\text{MN/m}^2$
<b>Erstbelastung</b>	0,02	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
<b>Entlastung</b>	0,30	0,10	0,00	–	–	–
<b>Wiederbelastung</b>	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
<b>Entlastung</b>	0,30	0,10	0,00	–	–	–

Die Messwerte müssen in mindestens ein Minutenabstand abgelesen werden. Wenn die Setzung (Hebung) unter  $0,02 \text{ mm/min}$  beträgt darf die nächste Laststufe aufgebracht werden.

Während der Versuchsdurchführungen sind Erschütterungen zu vermeiden.

### Versuchsauswertung

Protokolliert werden bei jeder Laststufe die abgelesenen Endsetzungen  $s$ . Die aufgetragenen Normalspannungen und dazugehörigen Endsetzungen werden in einem Druck-Setzungsdiagramm dargestellt. Zur Berechnung des Verformungsmoduls  $E_v$  werden die Endsetzungen der Laststufe 3  $s_1$  und Laststufe 5  $s_2$  der Belastungsphase herangezogen. Aus diesen Setzungen, ebenso wie aus den dazugehörigen Normalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ , wird die Differenz gebildet (Gleichung (1) und (2)). Welche in Gleichung (3) eingesetzt den Verformungsmodul  $E_v$  ergeben.

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (1)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 \quad (2)$$

$$E_v = \frac{0,75 \cdot d \cdot \Delta\sigma}{\Delta s} \quad (3)$$

$E_v$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul
$d$	[mm]	Durchmesser der Lastplatte
$\Delta s$	[0,01 mm]	Setzungsdifferenz
$s_1$	[0,01 mm]	zur unteren Normalspannung zugehörige Setzung
$s_2$	[0,01 mm]	zur oberen Normalspannung zugehörige Setzung
$\Delta\sigma$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Spannungsdifferenz
$\sigma_1$	[MN/m <sup>2</sup> ]	unteren Normalspannung
$\sigma_2$	[MN/m <sup>2</sup> ]	obere Normalspannung

Die Verformungsmoduln des Erst- und Zweitbelastungsastes werden mit  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$  bezeichnet.

## 2.2 Dynamische Lastplattenversuch (vgl. RVS 08.03.04: 2008)

### Gerätebeschreibung (RVS 08.03.04)

„Das LFG besteht aus drei Komponenten (s. Abb. 1 [Abb. 2]):

In einer kreisrunden Lastplatte ist zentrisch ein Beschleunigungssensor eingebaut. Die Unterseite der Lastplatte ist eben, auf der oberen Seite ist eine Zentrierkugel mittig angebracht.

Die Belastungsvorrichtung besteht aus einer Führungsstange, welche kraftschlüssig auf die Zentrierkugel der Lastplatte passt. Entlang der Führungsstange bewegt sich das Fallgewicht, welches im angehobenen Zustand in der Ausklinkvorrichtung gehalten wird und nach dem Ausklinken, durch die Schwerkraft beschleunigt, an der Stange hinuntergleitet, auf ein (vorgespanntes) Feder-Dämpfer-Element aufschlägt und dadurch die Lastplatte mit einem definierten Impuls belastet.

Eine elektronische Messeinheit ist mit dem Sensor in der Lastplatte verbunden, registriert dessen Signale bei der Versuchsdurchführung und berechnet die Messwerte des Versuches. Diese werden auf einem Display angezeigt und im Gerät gespeichert.“

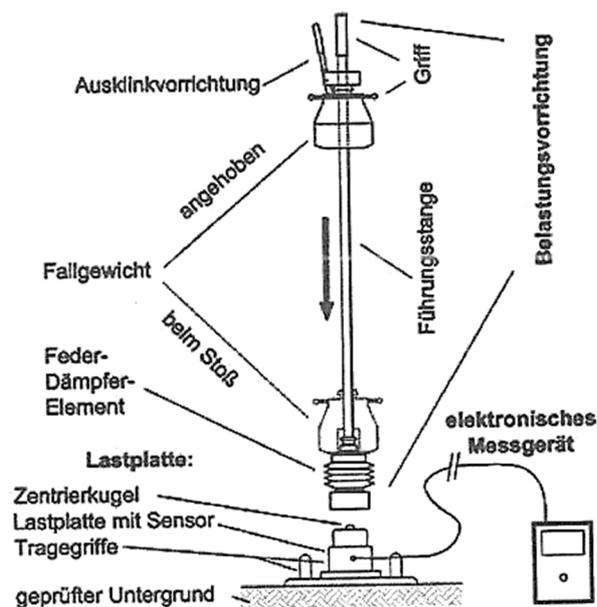


Abb. 2: schematische Darstellung, Dynamische Lastplatte (Abb. 1, RVS 08.03.04: 2008)

## Versuchsbedingungen und -voraussetzungen

Vor Versuchsbeginn ist dafür zu sorgen, dass die Prüffläche eben und möglichst horizontal verläuft. Um ein kraftschlüssiges Aufliegen der Lastplatte zu gewährleisten, ist loses Material zu entfernen und sind Unebenheiten eventuell mit einem trockenen, gleichkörnigen Mittelsand (z.B. Normensand) auszugleichen. Außerdem ist darauf zu achten, dass Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser größer 90 mm nicht direkt unter der Lastplatte vorhanden sind. Durch diese könnte das Messergebnis verfälscht werden. Außerdem ist die Durchführung des Versuches auf gefrorenem oder durchnässten Boden nicht zulässig.

## Versuchsdurchführung

Nach Herstellung einer normgerechten Prüffläche wird die Dynamische Lastplatte auf dieser aufgesetzt. Bei Versuchsdurchführung wird die Führungsstange lotrecht gehalten. Hierbei ist darauf zu achten, die Versuchsvorrichtung nicht zusätzlich zu belasten oder seitlich zu fixieren.

Zuerst werden drei Vorbelastungstöße durchgeführt. Bei jedem Stoß wird das Fallgewicht ausgeklinkt, schlägt auf dem Feder-Dämpfer-Element auf, gleitet wieder hoch und muss vom Prüfpersonal aufgefangen werden. Nach Durchführung dieser Vorbelastungen wird der eigentliche Versuch gestartet und aufgezeichnet. Für den Versuch werden drei Messstöße durchgeführt und deren Maximalsetzungen  $s_{max}$  sowie die Beschleunigungszeit  $s/v$  dokumentiert.

## Versuchsauswertung

Aus den dokumentierten Maximalsetzungen wird das arithmetische Mittel  $s_{max}$  gebildet.

Die Bestimmung des gemessenen Dynamischen Verformungsmodules  $E_{vd m}$  erfolgt mit Gleichung (4).

$$E_{vd m} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{max}}{s_{max}} = \frac{22,5}{s_{max}} \quad (4)$$

$E_{vd m}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	gemessener Dynamischer Verformungsmodul
$\sigma_{max}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	Maximum der mittleren Bodenspannung unter der Lastplatte (0,1 MN/m <sup>2</sup> )
$s_{max}$	[mm]	Mittelwert der Maximalsetzungen
$r$	[m]	Radius der Lastplatte (0,15 m)

Aus der Kalibriertabelle des Gerätes kann der dem geforderte Dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  zugeordnete gemessene Dynamische Verformungsmodul  $E_{vd m}$  entnommen und nachgewiesen werden. Der geringste bei der Prüfung gemessene  $E_{vd m}$  - Wert darf den  $E_{vd m}$  - Wert der Mindestanforderung nicht unterschreiten.

Ebenfalls kann ein geforderter Erstbelastungsmodul  $E_{vl}$  des statischen Lastplattenversuchs in die Mindestanforderung des Dynamischen Lastplattenversuches  $E_{vd}$  umgerechnet werden.

Für nichtbindige Böden kommen die Gleichungen (5) und (6) zur Anwendung und bei bindigen Böden die Gleichung (7).

$$\text{für } E_{vl} \geq 25 \text{ MN/m}^2 \text{ gilt: } E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} E_{vl} \quad (5)$$

$$\text{für } E_{vl} < 25 \text{ MN/m}^2 \text{ gilt: } E_{vd} = \frac{6}{5} E_{vl} \quad (6)$$

$$E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} E_{vl} \quad (7)$$

### **2.3 Troxler Isotopensonde – Einstichsonde (vgl. TP-BF-StB, Teil B 4.3: 1999)**

Mit dem radiometrischen Verfahren können die Dichte und der Wassergehalt von natürlich gewachsenen oder geschütteten Böden bestimmt werden. Das Verfahren mit Einstichsonde eignet sich für fein bis gemischt körnige Böden.

#### **Gerätebeschreibung und Messprinzip**

Das Prüfgerät besteht, vereinfacht beschrieben, aus einem Einstichstab, einer Strahlenquelle, Strahlungsdetektoren, Abschirmungen, einer Auswerte- und Anzeigeeinheit (siehe Abb. 3). Zur Ermittlung der Dichte des Bodens werden Gammastrahlen aus der Spitze des Einstichstabes in den Boden eingebracht. Anhand der von den Detektoren registrierten Direkt- und Streustrahlung und der Einstichtiefe kann auf die Dichte rückgeschlossen werden. Die Eindringtiefe des Einstichstabes ist je nach Gerät vom Hersteller maximiert (in der Regel mit 30 cm). Für die Bestimmung des Wassergehalts werden Neutronen von der an der Oberfläche sitzenden Strahlenquelle abgestrahlt. Die schnellen Neutronen werden durch die Wasserstoffatome im Boden abgebremst. Die Detektoren erfassen diese langsamen Neutronen.

In der Praxis kann der Einstichstab nicht exakt vertikal in den Boden eingebracht werden. Der sich dadurch ergebende relative Fehler wird durch eine zweite um 180° gedrehte Messung ausgeglichen.

Um weitere zu Fehlern führende Einflüsse zu verhindern, sollten sich für die Dichtebestimmung mit Einstichtiefen bis 15 cm keine großen Massen in einem Umkreis von einem Meter zum Messpunkt befinden. Gleichfalls ist eine hohe Feuchtigkeit im Umkreis die Wassergehaltsmessungen beeinflussend. Außerdem ist zu beachten, dass die berechnete Dichte dem Mittelwert über die Messtiefe entspricht.

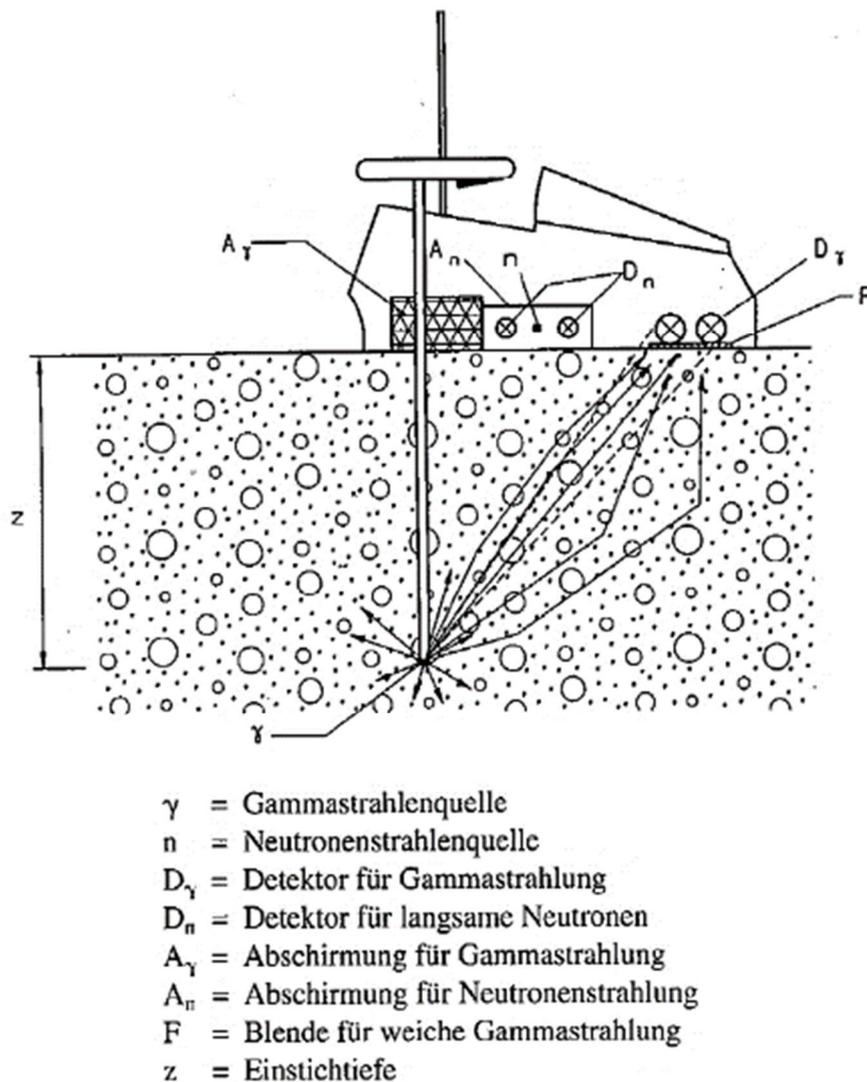


Abb. 3: Prinzipskizze einer Einstichsonde (TP BF-StB Teil B 4.3: 1999)

### Versuchsdurchführung

Die Oberfläche muss für die Messung eben sein. Für die Messung wird zuerst mit einem Fäustel ein Schlagorn am Messpunkt vertikal bis etwa fünf cm unter die Messtiefe getrieben. Anschließend wird der Einstichstab in das entstehende Loch eingeführt und aus der Arretierung gelöst. Ein etwaiger Luftspalt zwischen Einstichstab und Boden ist zu verhindern. Das Gerät wird dann für die berechnete Messdauer aktiviert. Messdaten werden vom Gerät ausgewertet, aufgezeichnet und angezeigt.

## 2.4 Bestimmung der Dichte des Bodens (Vgl. ÖNORM B 4414 Teil 2: 1979)

Bei der Dichte von Böden wird grundsätzlich zwischen Feuchtdichte, Trockendichte und Korndichte unterschieden. Zur Berechnung der Dichte wird die Masse und das Volumen einer Probe des zu prüfenden Bodens benötigt. Zur In-situ-Bestimmung des Volumens können abhängig von der Bodenart verschiedene Verfahren zur Anwendung kommen (siehe Tab. 3).

**Tab. 3:** übliche Probemengen in Abhängigkeit vom Verfahren der Volumensbestimmung (Auszug aus Tabelle 1; ÖNORM B 4414-2: 1979)

Verfahren der Volumensermittlung	übliche Probemenge
Ausstechzylinder	1,5 kg bis 3 kg
Sandersatz	6,0 kg bis 12 kg
Flüssigkeitsersatz	6,0 kg bis 60 kg
Meßkörper	6,0 kg bis 12 kg
Schürfgrube	0,7 t bis 2 t
Schüttkörper	10 t bis 400 t

**Tab. 4:** Eignung der Verfahren in Abhängigkeit von der Bodenart (ÖNORM B 4414-2: 1979)

Bodenart		Verfahren	
		gut geeignet	ungeeignet
bindige Böden	ohne Kieskorn	Ausstechzylinder-Verfahren	keine
	mit Kieskorn	alle Ersatz- und Meßkörper-Verfahren	Ausstechzylinder-Verfahren
nicht bindige Böden	Fein- bis Mittelsande	Ausstechzylinder-Verfahren	Meßkörper-Verfahren
	Kies-Sand-Gemische	alle Ersatz-Verfahren	Ausstechzylinder- und Meßkörper-Verfahren
	sandarme Kiese	alle Ersatz-Verfahren (mit flacher Mulde)	
Böden mit Steinen und Blöcken		Schürfgruben und Schüttkörper-Verfahren	alle anderen Verfahren
Anmerkung: Die Anwendbarkeit der Verfahren bei weichen bindigen Böden und bei locker gelagerten nicht bindigen Böden kann in Frage gestellt sein.			

Nachfolgend werden die im Probefeld angewandten Versuche näher beschrieben. Die anderen Versuche können der ÖNORM B4414-2 entnommen werden.

## 2.4.1 Flüssigkeitsersatz-Verfahren (Vgl. ÖNORM B 4414-2: 1979)

### Gerätebeschreibung und Versuchsbedingungen

Für die Ermittlung der Dichte mittels Flüssigkeitsersatz-Verfahren werden Flüssigkeiten z.B. Wasser mit einem definierten Volumen, eine Plane, ein Stahl- oder Kunststoffring mit einem Durchmesser  $D$  von maximal 1,5 m und einer Höhe von 20 cm bis 30 cm, einer Messbrücke und einem Stechpegel, außerdem ein verschließbarer Behälter, eine Schaufel oder Ähnliches und eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 10$  g benötigt.

### Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn muss die Prüfstelle möglichst eben und frei von Verunreinigung hergestellt werden. Der Ring wird auf die Oberfläche gesetzt und mit der Plane ausgelegt. Ein definiertes Volumen  $V_w$  an Flüssigkeit wird in die Form gefüllt und die Höhe mittels des Stechpegels an vier Punkten abgelesen ( $h_{w1}$  bis  $h_{w4}$ ).

Die Plane mit der Flüssigkeit wird wieder entfernt und eine flache Prüfgrube ausgehoben. Dabei ist darauf zu achten, dass der Ring in seiner Lage nicht verändert wird. Das Material wird in einen verschließbaren, trockenen Behälter gefüllt und am besten vor Ort gewogen (Masse der feuchten Probe  $m$ ).

Die Plane wird wieder in den Ring gelegt und mit einem bestimmten Volumen  $V_w'$  Flüssigkeit gefüllt. Mit dem Stechpegel wird erneut der Flüssigkeitsstand gemessen ( $h_{w1}'$  bis  $h_{w4}'$ ).

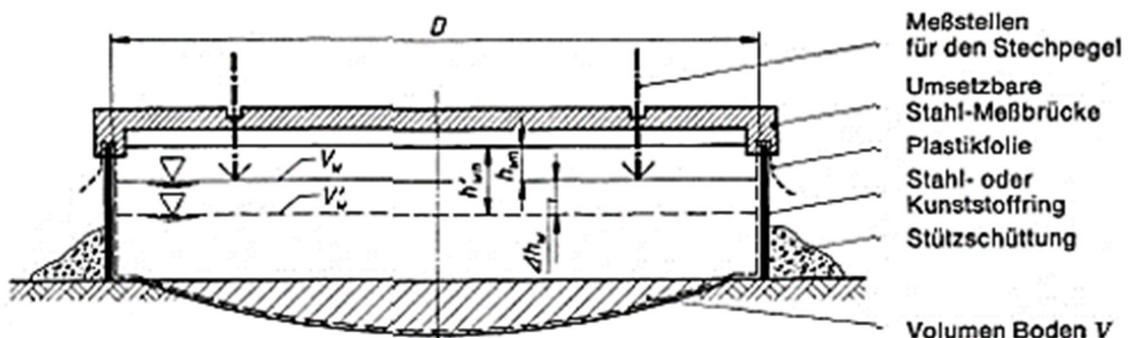


Abb. 4: Versuchsanordnung beim Flüssigkeitsersatz-Verfahren (ÖNORM B 4414-2: 1979)

### Versuchsauswertung

Die Differenz der Flüssigkeitsspiegel  $\Delta h_w$  wird mit Gleichung (8) berechnet.

$$\Delta h_w = \frac{\sum_{n=1}^4 h_{wn}' - \sum_{n=1}^4 h_{wn}}{4} \quad (8)$$

Das Ergebnis der Gleichung (8) eingesetzt in die Gleichung (9) ergibt die Volumensdifferenz  $\Delta V_w$  der beiden Messungen.

$$\Delta V_w = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \Delta h_w \quad (9)$$

Gleichung (10) beschreibt die Berechnung des Volumens der Probe  $V$ .

$$V = V_w' + \Delta V_w - V_w \quad (10)$$

$\Delta h_w$	[cm]	Differenz der Flüssigkeitsspiegel
$h_{wn}$	[cm]	Höhe Flüssigkeitsspiegel der Nullmessung
$h_{wn}'$	[cm]	Höhe Flüssigkeitsspiegel nach Probeentnahme
$\Delta V_w$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumensdifferenz
$D$	[cm]	Durchmesser
$V$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Probe
$V_w$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Nullmessung
$V_w'$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen nach Probeentnahme

## 2.4.2 Sandersatz-Verfahren (Vgl. ÖNORM B 4414-2: 1979)

### Gerätebeschreibung und Versuchsbedingungen

Für die Durchführung des Sandersatz-Verfahren werden eine Stahlringplatte mit einem Innendurchmesser  $d_i \geq 200$  mm und mindestens dem vierfachen Größtkorn-Durchmesser, ein Doppeltrichter (siehe Abb. 5), ein verschließbarer Behälter, eine Schaufel oder Ähnliches und eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 10$  g benötigt. Für die Volumensbestimmung wird ein trockener (Wassergehalt  $w < 0,002$ ) Prüfsand mit zuvor bestimmter Schüttdichte  $\rho_E$  verwendet. Bei einem höheren Wassergehalt kommt es zu starker Variation der Schüttdichte.

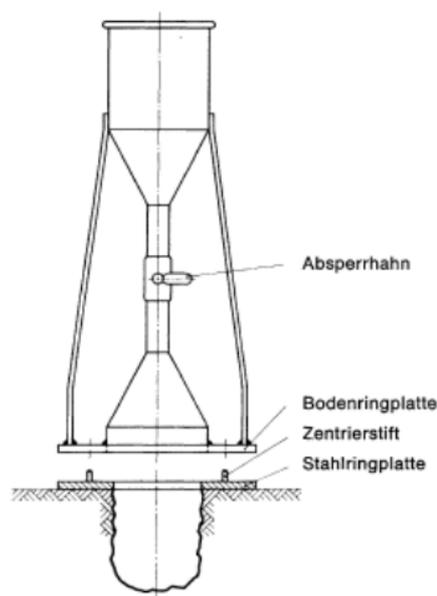


Abb. 5: Doppeltrichter mit Stahlringplatte (ÖNORM B 4414-2: 1979)

### Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn muss die Prüfstelle möglichst eben und frei von Verunreinigung hergestellt werden. Die Stahlringplatte wird auf die Oberfläche gesetzt und fixiert. Innerhalb der Stahlringplatte wird eine Prüfgrube mit einer Tiefe von  $d_i$  bis  $1,5 d_i$  ausgehoben. Die Wände der Prüfgrube sollten möglichst standfest sein und lockeres Material entfernt werden.

Das Material wird in einen verschließbaren, trockenen Behälter gefüllt und am besten vor Ort gewogen (Masse der feuchten Probe  $m$ ). Der Doppeltrichter wird mit Prüfsand befüllt und abgewogen ( $m_3$ ) und auf die Stahlringplatte aufgesetzt. Nach dem Öffnen des Absperrhahnes füllt der Prüfsand die Prüfgrube, den unteren

Trichter und den Hohlraum der Stahlringplatte auf. Um die Schüttdichte nicht zu beeinflussen müssen Erschütterungen möglichst vermieden werden.

Nachdem der Sand den Hohlraum komplett ausgefüllt hat wird der Absperrhahn wieder geschlossen. Der Doppeltrichter mit dem verbleibenden Prüfsand wird erneut abgewogen ( $m_3'$ ).

### Versuchsauswertung

Die Differenz der beiden Wägungen  $m_g$  entspricht dem verbrauchten Prüfsand und wird mit Gleichung (11) berechnet.

$$m_g = m_3 - m_3' \quad (11)$$

Eingesetzt in die Gleichung (12) kann das Volumen der Prüfgrube  $V$  errechnet werden.

$$V = \frac{m_g}{\rho_E} \quad (12)$$

$m_g$	[g]	Masse verbrauchter Prüfsand
$m_3$	[g]	Masse Trichter mit Prüfsand vor dem Versuch
$m_3'$	[g]	Masse Trichter mit Prüfsand nach dem Versuch
$V$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Probe
$\rho_E$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Schüttdichte

### 2.4.3 Stahlkugellersatzverfahren (Vgl. Ahmetovic, 2015)

Das Verfahren eignet sich für ungleichkörnige oder grobkörnige Böden, wobei die Anwendbarkeit bei großen Poren eingeschränkt ist.

#### Gerätebeschreibung und Messprinzip

Für die Durchführung des Stahlkugellersatz-Verfahren werden folgende Utensilien benötigt:

- eine Aluminiumplatte mit einer Größe von 30 cm x 30 cm mit einer Öffnung mit einem Durchmesser von  $d_i \geq 10$  cm und einem mindestens 1 cm hohen Rand (siehe Abb. 6),

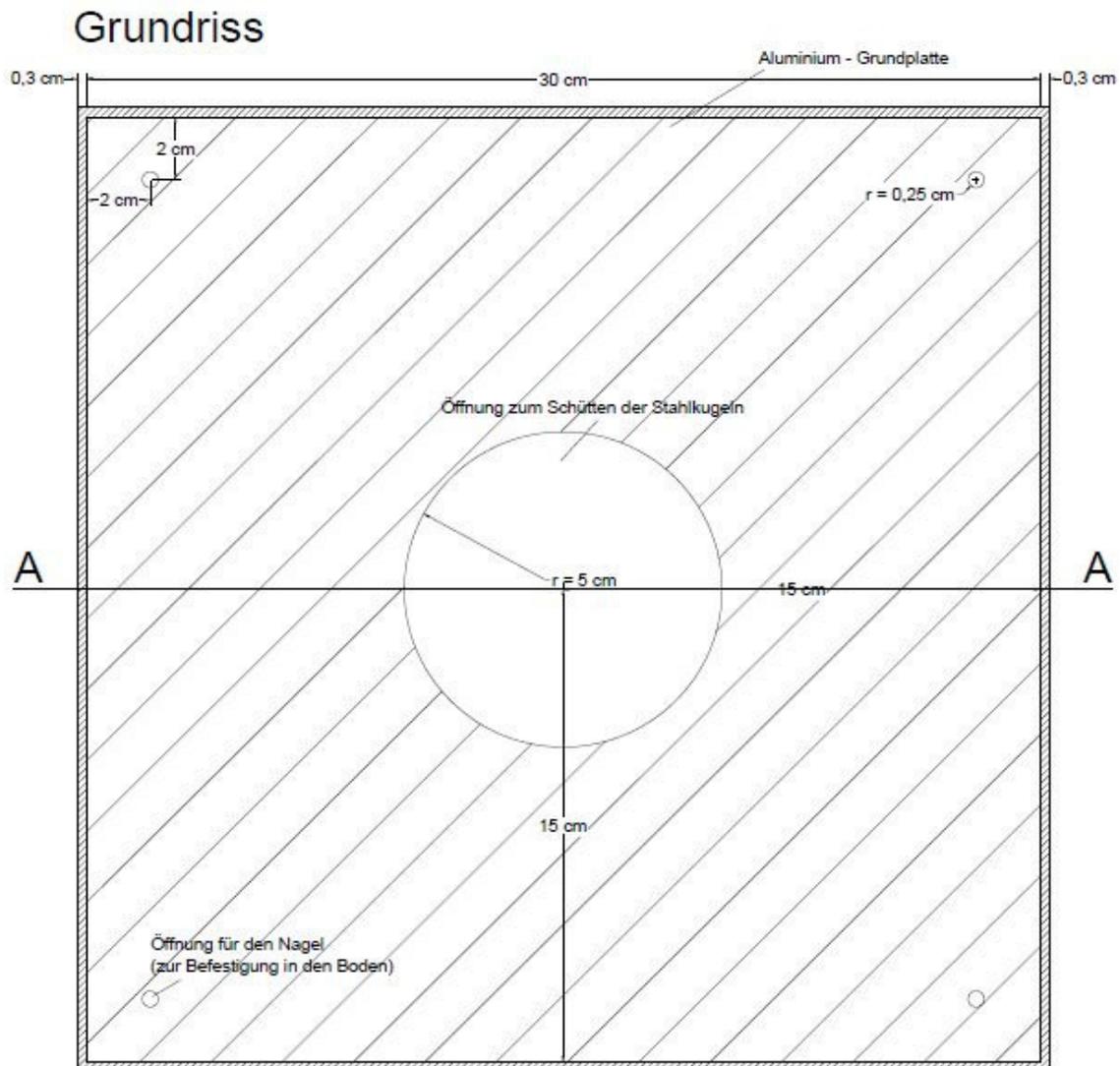
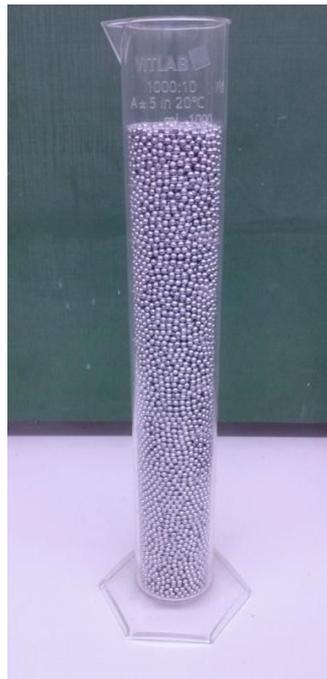


Abb. 6: Aluminium – Grundplatte, Grundriss (Ahmetovic 2015)

- ein Stahllineal,
- ein verschließbarer Behälter,
- eine Schaufel oder Ähnliches,
- eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  g,
- eine Metallschaufel,
- ein Magnet,
- ein Messzylinder mit einem Fassungsvermögen von mindestens 1000 ml und einer Skala in 10 ml Schritten,
- Edelstahlkugeln mit einem Durchmesser von ca. 5 mm (siehe Abb. 7).



**Abb. 7:** Messzylinder, Stahlkugellersatzverfahren (Ahmetovic, 2015)

### Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn muss die Prüfstelle möglichst eben und frei von Verunreinigung hergestellt werden. Die Aluminiumplatte wird auf die Oberfläche gesetzt und fixiert. Innerhalb der Ringöffnung wird eine Prüfgrube mit einer Tiefe von 15 cm bis 20 cm ausgehoben. Die Wände der Prüfgrube sollten möglichst standfest sein und lockeres Material entfernt werden. Das Material wird in einen verschließbaren, trockenen Behälter gefüllt und am besten vor Ort gewogen (Masse der feuchten Probe  $m$ ).

Die Prüfgrube wird nun durch Schütten der Stahlkugeln aus einer Höhe von etwa 5 cm bis 10 cm über der Oberfläche der Prüfgrube aus dem Messzylinder leicht überfüllt. Die überschüssigen Stahlkugeln werden entlang der Geländeoberkante mit dem Stahllineal abgezogen, gereinigt und in den Messzylinder zurückgegeben. Das Volumen der verbleibenden Stahlkugeln kann nun an dem Messzylinder abgelesen werden ( $V_k$ ).

### Versuchsauswertung

Das Volumen der Prüfgrube ergibt sich aus der Gleichung (13).

$$V = \sum_{n=1}^i (V_{Zi} - V_{Ki}) - (D_p \cdot A_0) \quad (13)$$

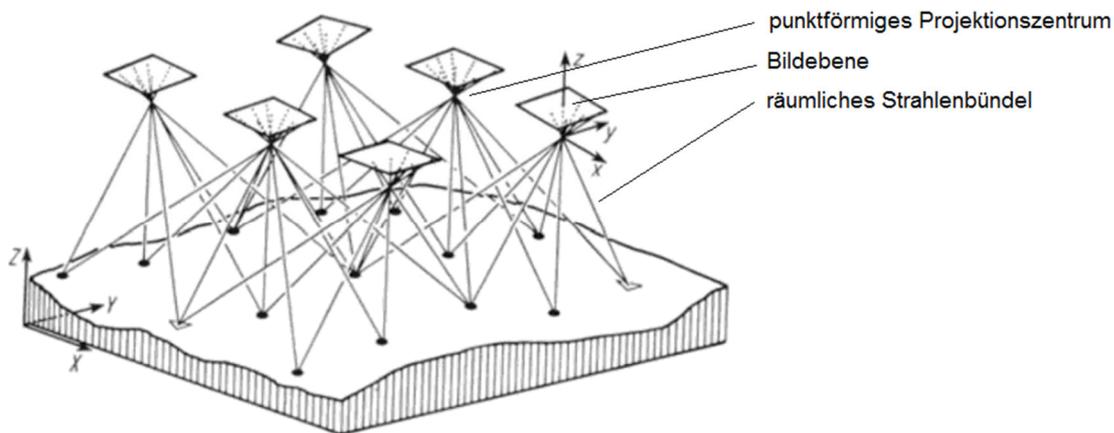
$V_{Zi}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der Stahlkugeln im Messzylinder vor der Füllung in die Prüfgrube
$V_{Ki}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen der verbleibenden Stahlkugeln im Messzylinder nach der Füllung in die Prüfgrube
$D_p$	[cm]	Dicke der Aluminium – Grundplatte
$A_0$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche der Öffnung in der Aluminium – Grundplatte

## 2.5 Smart Density Determination

Mit der „Smart Density Determination“ (kurz SDD) wird ein neuartiges Verfahren zur In-situ-Dichtebestimmung bezeichnet. Durch seine einfache Handhabung und zeitnahen Erhalt der Ergebnisse sollen die derzeitigen Versuchsabläufe verbessert werden. Die Dichte des Materials  $\rho = M / V$  soll durch Messung der Masse  $M$  und des dazugehörigen Volumens  $V$  bestimmt werden. Während bei den derzeit üblichen Substitutionsmethoden z.B. Flüssigkeitsersatz-Verfahren (Vgl. ÖNORM B 4414-2: 1979), Sandersatz-Verfahren (Vgl. ÖNORM B 4414-2: 1979) eine Prüfgrube ausgehoben und mit einem bekannten oder bestimmbareren Volumen wieder aufgefüllt wird, soll dieses Volumen mit Hilfe des Prinzips der Photogrammetrie ermittelt werden. Außerdem wird angestrebt, die derzeit im Labor durchgeführte Wassergehaltsbestimmung mittels Feuchtigkeitsmessgerät auch in situ durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bestimmung des Volumens diskutiert und im Zuge des österreichweiten Rundversuchs auf ihre Praxistauglichkeit getestet.

### 2.5.1 Photogrammetrie (vgl. Schwidefsky und Ackermann, 1976)

Die Photogrammetrie beschreibt die Wissenschaft aus zweidimensionalen Bildern ein dreidimensionales Modell zu erstellen und exakte geometrische Messungen zu ermöglichen. Jedes Objekt im Raum besteht aus Objektpunkten mit geometrischen Informationen. Werden diese Objekte mit Bildern festgehalten, müssen nunmehr die Bildpunkte den Objektpunkten zugeordnet werden. Hierfür werden mindestens zwei Bilder von dem selbigen Objekt benötigt. Abb. 8 zeigt schematisch die Elemente der perspektivischen Abbildung.



**Abb. 8:** Das geometrische Modell der photogrammetrischen Aufnahme (Bildverband) (Photogrammetrie: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen; Ackermann)

Für die Bildpunkte als auch für die Objektpunkte wird jeweils ein rechtsdrehendes kartesisches Koordinatensystem eingeführt, das Objekt- ( $X, Y, Z$ ) und das Bild-Koordinatensystem ( $x, y, z$  oder  $x', y', z'$ ). Die  $z$ -Achse des Bildkoordinatensystems steht senkrecht auf die Bildebene und verläuft durch das Projektionszentrum, daher ergibt sich ein konstanter  $z$ -Abstand für alle Bildpunkte mit  $z = \pm c$  ( $c =$  Kammerkonstante). Die  $y$ - und  $x$ - Achse verlaufen parallel zur Bildebene. Mit den von den Bildpunkten durch das Projektionszentrum verlaufenden geometrischen Abbildungsstrahlen (räumliches Strahlenbündel) können die Objektpunkte rekonstruiert werden.

### **Passpunkte**

Zur Herstellung der Beziehung zwischen Objekt und Abbildung werden Passpunkte zur Bestimmung der Orientierungsparameter verwendet. Die Koordinaten im Objektsystem dieser Passpunkte werden vorab bestimmt und können in den Bildern bzw. dem Modell gemessen werden. Anstelle von Passpunkten können auch andere Bezugsgrößen wie Strecken, Höhenunterschiede oder absolute geometrische Bedingungen herangezogen werden.

## **2.5.2 Volumensbestimmung mittels SDD**

### **Gerätebeschreibung**

Für die Ermittlung des Volumens werden eine möglichst hochauflösende Kamera mit Kamerastativ, ein Korb mit geometrisch bekannten Passpunkten, Aufsetzstützen für den Korb und eine Schaufel oder Ähnliches benötigt.

### **Versuchsdurchführung**

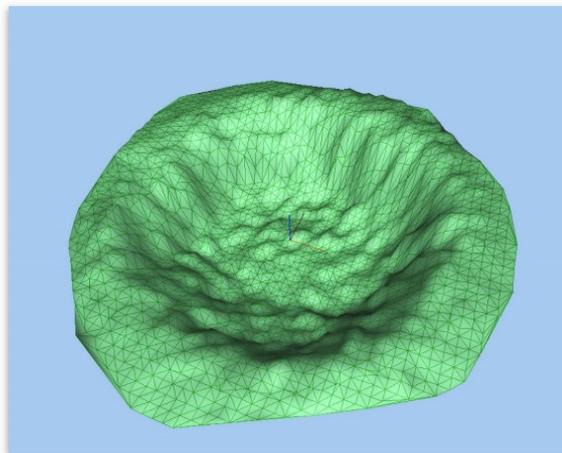
Vor Versuchsbeginn muss die Prüfstelle möglichst eben und frei von Verunreinigung hergestellt werden. Zur Fixierung der Lage des Korbes werden Aufsetzstützen in den Boden eingebracht und der Korb auf diese aufgesetzt. Mit der Kamera werden senkrecht auf den Korb blickend mehrere (mindestens zwei) Bilder aufgenommen (Nullmessung). Dafür ist die Fixierung der Kamera auf einem Stativ oder Lotstab empfohlen (siehe Abb. 9). Der Korb kann entfernt werden und innerhalb der Aufsetzstützen wird eine Prüfgrube mit einer Tiefe von mindestens 200 mm ausgehoben. Die Wände der Prüfgrube sollten möglichst standfest sein und lockeres Material entfernt werden. Der Korb wird erneut auf die Aufsetzstützen gesetzt und wie zuvor werden Bilder aufgenommen (Messung mit Prüfgrube).



**Abb. 9:** Versuchsaufbau SDD

### Versuchsauswertung

Für die Auswertung des Volumens wird das oben beschriebene Prinzip der Photogrammetrie in einem Computerprogramm analytisch umgesetzt. Aus den Bildern der Nullmessung und der Messung mit Prüfgrube werden dreidimensionale Oberflächen erstellt (siehe Abb. 10). Die Differenz der beiden Oberflächen entspricht dem ausgehobenen Volumen. Die Genauigkeit der Messdaten ist abhängig von der Anzahl der aufgenommenen Bilder. Außerdem haben die Kameraparameter einen Einfluss, die Modellberechnung muss mit diesen kalibriert werden. Ein detaillierter Bericht über die Berechnung wird in Anhang A dargestellt.



**Abb. 10:** Modellierte Oberfläche der Prüfgrube

## 2.6 Bestimmung des Wassergehaltes (Vgl. ÖNORM EN ISO 17892-1: 2015)

Der Wassergehalt des Bodens  $w$  wird aus dem Verhältnis der Masse des freien Wassers  $m_w$  zur Masse der trockenen Bodenbestandteile  $m_d$  errechnet. Die Probeentnahme hierfür erfolgt mit einem der in Kapitel 2.4 beschriebenen Verfahren.

### Gerätebeschreibung und Versuchsbedingungen

Für die Trocknung der Probe wird ein Probebehälter aus hitzebeständigen Material, eine Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,010$  g bzw.  $\pm 0,1$  M-%, ein Thermometer mit einer Fehlergrenze von  $1$  °C und ein Umluft-Trocknungsöfen benötigt. Aus dem zu bestimmenden Boden wird eine repräsentative Probe entnommen. Die Mindestmengen hierfür sind Tab. 5 zu entnehmen

**Tab. 5:** Mindestprobemasse für Wassergehaltsbestimmung (Auszug aus Tabelle 1, ÖNORM EN ISO 17892-1: 2015)

Korndurchmesser $D_{max}$ mm	Empfohlene Mindestmasse der feuchten Proben g
0,063	30
2,0	100
10,0	500
31,5	3000
63,0	21000

### Versuchsdurchführung

Die feuchte Probe wird in einen Prüfbehälter mit bekannter Masse ( $m_c$ ) gegeben und abgewogen ( $m_1$ ). Zur Trocknung wird der Behälter mit der Probe bei  $105$  °C bis  $110$  °C in den Trocknungsöfen gestellt. Nach einer Mindestdauer von  $16$  h bei feinkörnigen Material bzw.  $4$  h bei grobkörnigen oder nach Erreichen der Massekonstanz (Masseänderung innerhalb mindestens eine Stunde um weniger als  $0,1$  M-%) ist die Trocknung abgeschlossen. Bei organischem Anteil ist zu beachten, dass dieser bei Hitze verbrennt, daher nicht der reine Wasseranteil bestimmt wird.

Nach der Trocknung ist der Prüfbehälter aus dem Trocknungsöfen zu nehmen und auf Raumtemperatur abkühlen zu lassen. Hierfür sollte bei Feuchtigkeit anziehenden Stoffen ein Behälter mit Deckel oder ein Exsikkator verwendet werden. Die abgekühlte Probe wird mit dem Prüfbehälter erneut gewogen ( $m_2$ ).

**Versuchsauswertung**

Die Berechnung des Wassergehalts  $w$  erfolgt mit Gleichung (14).

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (14)$$

$w$	[M-%]	Wassergehalt
$m_1$	[g]	Masse der feuchten Probe mit Prüfbehälter
$m_2$	[g]	Masse der trockenen Probe mit Prüfbehälter
$m_c$	[g]	Masse des Prüfbehälters
$m_w$	[g]	Masse des Wassers
$m_d$	[g]	Masse der trockenen Probe

## 3 Österreichweiter Rundversuch

Zur Feststellung der Genauigkeit und der Präzision der Versuche wurden im Zuge der Erdbaulaborantentage 2018 Bodenprüfanstalten, in weiterer Folge Labors genannt, aus ganz Österreich zu einem Rundversuch eingeladen. Das Probefeld für die Durchführung des österreichweiten Rundversuchs wurde in einer Kiesgrube der Welser Kieswerke Treul & Co GmbH in Gunskirchen errichtet. Zur Qualitätssicherung und Weiterentwicklung der Prüfmethode werden regelmäßig derartige Rundversuche der akkreditierten Prüfanstalten durchgeführt. In diesem Rundversuch lag der Schwerpunkt auf den Tragfähigkeitsuntersuchungen und der In-situ-Dichtebestimmung.

### 3.1 Teilnehmende Labors

Folgende Bodenprüfanstalten nahmen an dem Rundversuch teil:

- Bernegger GmbH, Molln
- BPS GmbH, Leonding
- GEOENGINEERING, Klosterneuburg
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 16, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst, Referat Straßenbautechnik
- LBB, Graz
- MAPAG Materialprüfung GmbH, Gumpoldskirchen
- Materialprüfanstalt Hartl GmbH, Wolkersdorf
- NIEVELT Labor GesmbH, Stockerau
- NIEVELT Labor GmbH, Hall in Tirol
- PRÜFBAU GmbH, Lieboch
- SWIETELSKY Baugesellschaft m.b.H., Traun
- TPA GmbH, Wien
- TU Graz, Geotechnisches Labor, Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Das Verfahren der In-situ-Dichtebestimmung mittels Smart Density Determination wird gemeinsam mit der Vermessung ADP Rinner ZT GmbH aus Graz entwickelt und im Zuge des österreichweiten Rundversuches getestet.

Die Listung der Prüfanstalten folgt an dieser Stelle alphabetisch. Die Nummerierung in der Versuchsauswertung unterscheidet sich von dieser Reihenfolge. Um keine Nachteile für die Teilnehmer zu generieren wird die Nummerierung anonymisiert, nur den Prüfanstalten ist die Zuteilung der Nummern bekannt.

## 3.2 Vorversuch

Das Probefeld für den Rundversuch wurde in der Kiesgrube errichtet. Das Material dafür wird dem vorort lagernden Kies und Bruchschotter entnommen und schichtweise aufgetragen und verdichtet. Der Vorversuch fand am 12. April 2018 von 8:00 Uhr bis etwa 16:00 Uhr statt.

## 3.3 Aufbau des Probefeldes (Vorversuch)

Der Untergrund, auf welchen die Schichten des Probefeldes aufgetragen wurden, ist ein gewachsener kiesiger Boden in der bestehenden Kiesgrube. Aufgrund der Lage unter dem Ursprungsgelände und durch das Befahren mit schweren Lastkraftwägen ist davon auszugehen, dass der Untergrund keinen relevanten Einfluss auf die Messergebnisse der Tragfähigkeitsuntersuchungen hat.

Auf diesen Untergrund wurde eine etwa 30 cm starke Schicht Bruchschotter mit einem Größtkorn von  $d_{GK} = 63$  mm mit einem Grader aufgebracht und verdichtet. Als zweite Schicht wurde etwa 15 cm Kies mit einem Größtkorn  $d_{GK} = 32$  mm aufgebracht und ebenfalls verdichtet.

Das Probefeld wurde zwei Tage vor Durchführung der Versuche hergestellt. Das Material war beim Aufbringen feucht. Die Temperaturen in diesen Tagen bewegten sich zwischen etwa 4 und 25 °C (accuweather 2018).

## 3.4 Versuchsanordnung (Vorversuch)

Folgende Versuche sollten von jedem Teilnehmer durchgeführt werden:

- Dynamischer Lastplattenversuch an einem Messpunkt mit drei Messungen
- ein statischer Lastplattenversuch
- vier Dichtebestimmungen mittels Troxler Isotopensonde
- eine Dichtebestimmung mittels Sandersatz-Verfahren oder Flüssigkeitsersatz-Verfahren

Ergänzend wurde eine Vorführung des Stahlkugellersatzverfahren durch die Laboranten der TU Graz geplant.

Parallel zu der In-situ-Dichtebestimmung der Laboranten sollte die Smart Density Determination (SDD) bei jeder Prüfgrube durch die Vermessung ADP Rinner ZT GmbH durchgeführt werden.

Abb. 11 zeigt die geplante Versuchsanordnung auf dem Probefeld. Das Probefeld wird hierfür in zwei Hälften geteilt, wobei auf der einen Hälfte (links in der Abbildung) die Tragfähigkeitsuntersuchungen mittels dynamischen- und statischen Lastplattenversuch stattfinden und auf der zweiten Hälfte (rechts) die In-situ-Dichtebestimmungen durchgeführt werden. Die Abstände der Messpunkte wurden mit einem Meter festgelegt. Die Nummerierung der Prüffelder beschreibt die chronologische Abfolge der Labors und entspricht nicht der zugeteilten Nummerierung.

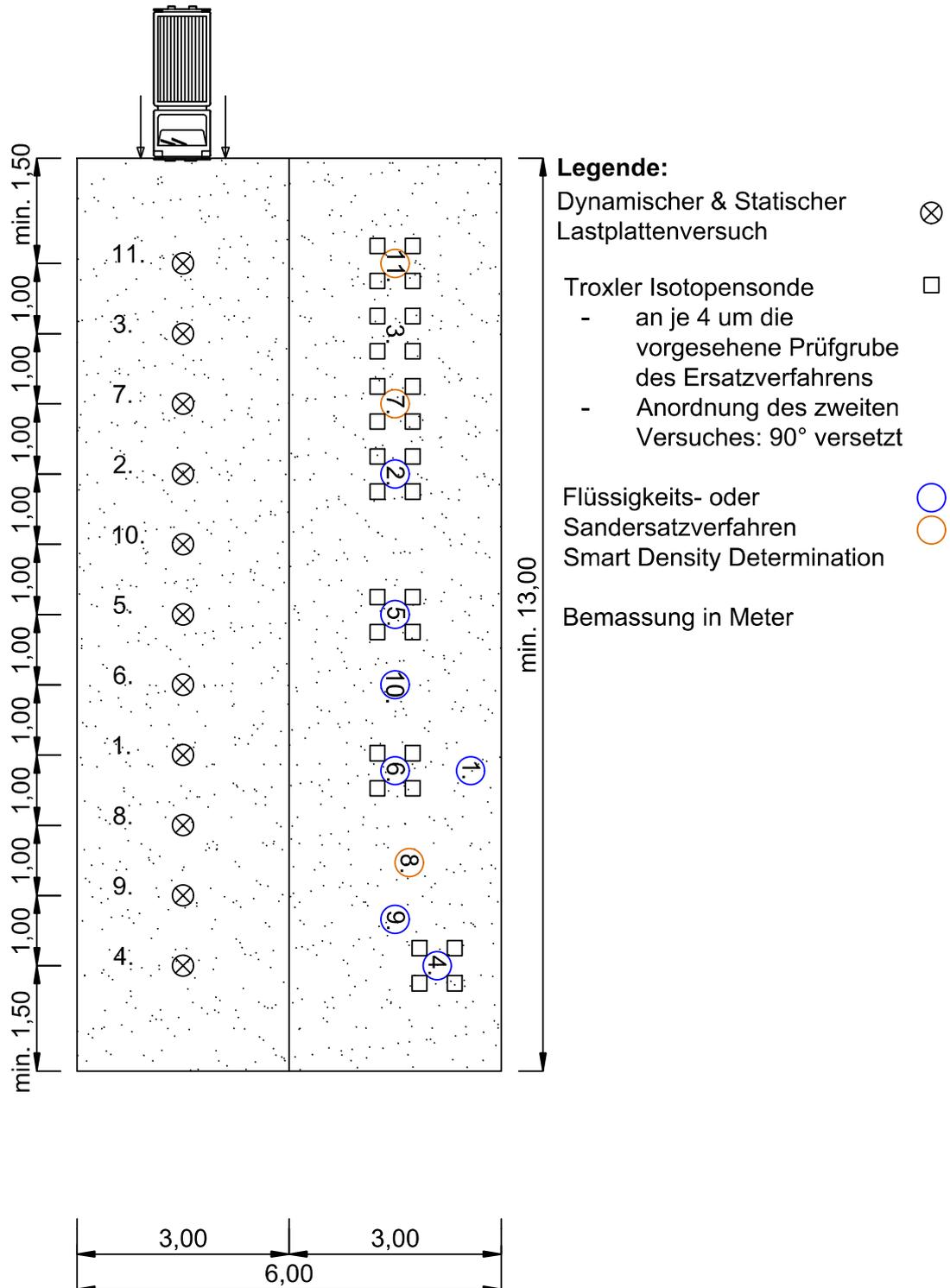


Abb. 11: Prinzipskizze, Versuchsanordnung am Probefeld, Vorversuch

### **3.5 Ablaufkonzept der Versuche (Vorversuch)**

#### **Tragfähigkeitsuntersuchung**

1. Durchführung des dynamischen Lastplattenversuches an dem dafür vorgesehenen Messpunkt.
2. Durchführung des statischen Lastplattenversuches mit großer Laststufe an derselben Stelle wie der dynamische Lastplattenversuch.

#### **In-situ-Dichtebestimmung**

1. Festlegen der Lage der Prüfgrube
2. Messungen an vier Messstellen mittels Troxler Isotopsonde rund um die Prüfgrube mit einer Einstichtiefe von 25 cm
3. Aufnahme der unberührten Oberfläche mittels SDD
4. Prüfgrubenaushub (Wägung, Feuchtigkeitsbestimmung)
5. Aufnahme der Prüfgrube mittels SDD
6. Volumensbestimmung mittels Flüssigkeits- oder Sandersatz
7. Wassergehalt im Labor bestimmen

### **3.6 Anmerkungen zur Durchführung (Vorversuch)**

Am Tag der Durchführung war das Wetter wie in den Tagen zuvor sonnig, teilweise bedeckt bei bis zu 25 °C. Aufgrund der Witterung war das aufgetragene Material trockener als zum Zeitpunkt des Aufbringens. Im Laufe des Tages wurde die Oberfläche des Probefeldes durch die Sonne getrocknet, dies kann zu Abweichungen des Wassergehaltes der entnommenen Proben führen.

- Als Gegengewicht der Statischen Lastplatte wurde ein Lastkraftwagen verwendet. Um das Betreten der zu prüfenden Fläche zu verhindern, wurde die Fahrtrichtung des LKWs so gewählt, dass das Fahrzeug über den noch zu prüfenden Bereichen steht (siehe Abb. 12).

- Die Durchführung der In-situ-Dichtebestimmungen wurde je nach zeitlichem Eintreffen der Laboranten teilweise zeitgleich durchgeführt.
- Die Wasserersatzverfahren wurden von allen Labors außer Labor 1 mit einem Densitometer durchgeführt.
- Bei der Verwendung der Troxler Isotopsonde wurde auf einen Mindestabstand von einem Meter zu großen Massen (in diesem Fall der LKW) geachtet. Außerdem befand sich immer nur ein Messgerät im Betrieb und auch hier wurde auf einen möglichst großen Abstand der Messgeräte zueinander geachtet.

In Abb. 12 ist die tatsächliche Versuchsanordnung auf dem Probefeld dargestellt. Dieser kann die Nummerierung der Prüffelder für die in Kapitel 4 beschriebene Auswertung der Prüfergebnisse entnommen werden.

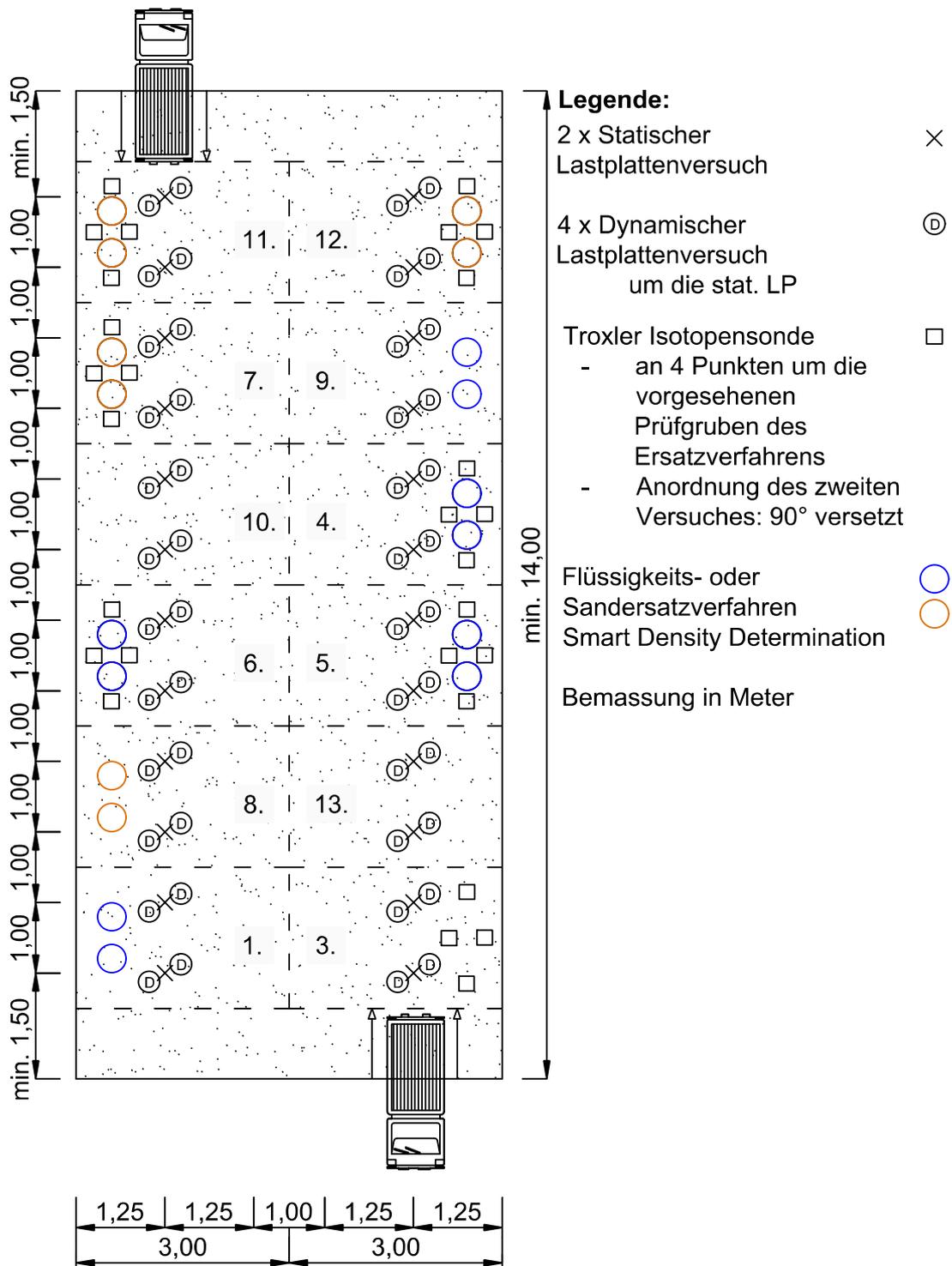


Abb. 12: tatsächliche Versuchsanordnung am Probefeld, Vorversuch

### **3.7 Problematik und Erkenntnisse (Vorversuch)**

Wie in Kapitel 3.3 Aufbau des Probefeldes (Vorversuch) beschrieben, betrug die Schichtdicke des Rundkieses nur etwa 15 cm. Aufgrund des darunter liegenden Bruchschotters war das senkrechte Einrammen des Schlagdornes bis auf die geplante Tiefe von 30 cm nicht möglich. Diese Problematik wurde bei der Durchführung des ersten Versuches erkannt und die Messtiefe daher für alle Versuche mittels Troxler Isotopsonde auf 20 cm herabgesetzt. Außerdem wurde die Sonde für die zweite Messung um 90 ° gedreht, da eine 180 ° Drehung nicht möglich war.

Augenscheinlich war der Feinanteil an der Oberfläche des Probefeldes geringer als in der Schichte. Dieser Umstand kann durch Erosion entstanden sein. Die hinzukommende geringe Feuchtigkeit des Materials führte zu einem relativ losen Material an der Oberfläche. Durch diesen Umstand wurde die Durchführung der Ersatzverfahren erschwert. Das einfallende lose Material kann das Prüfergebnis beeinflusst haben und ein Ausbrechen der Prüfgrube unter den Rand des Stahlringes konnte nicht immer verhindert werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Materialschichten und der geringen Feuchtigkeit in den oberen Zentimetern wird eine Abweichung der Ergebnisse der Dichte und des Wassergehaltes abhängig von der Tiefe der Prüfgrube vermutet.

### **3.8 Aufbau des Probefeldes (Hauptversuch)**

Die unter 3.7 Problematik und Erkenntnisse (Vorversuch) angeführten Punkte wurden in der Planung des zweiten Probefeldes berücksichtigt. Für das Probefeld wurde eine weitere etwa 30 cm starke Schicht Rundkies mit einem Größtkorn von  $d_{GK}=32$  mm auf das bestehende erste Probefeld aufgebracht und verdichtet. Das Probefeld wurde auch dieses Mal ein paar Tage vor Durchführung der Versuche hergestellt. Das Material war beim Aufbringen feucht. Die Temperaturen in diesen Tagen bewegten sich etwa von 9 bis 29 °C (accuweather 2018). Der Hauptversuch fand am 12. Juli 2018 von 8:00 Uhr bis etwa 16:00 Uhr statt.

### 3.9 Versuchsanordnung (Hauptversuch)

Folgende Versuche sollten von jedem Teilnehmer durchgeführt werden:

- Dynamischer Lastplattenversuch an vier Messpunkten mit je drei Messungen
- zwei statische Lastplattenversuche
- vier Dichtebestimmungen mittels Troxler Isotopsonde
- zwei Dichtebestimmungen mittels Sandersatz-Verfahren oder Flüssigkeitsersatz-Verfahren

Ergänzend wird von der TU Graz die Volumensbestimmung mittels Stahlkugelerersatzverfahren in deren Prüfgruben geplant.

Parallel zu der In-situ-Dichtebestimmung der Laboranten sollte die Smart Density Determination (SDD) durch die Vermessung ADP Rinner ZT GmbH bei jeder Prüfgrube durchgeführt werden.

Ergänzend wird eine Vergleichsmessung der Ersatzverfahren und der Smart Density Determination an einer Prüfgrube durchgeführt. Hierfür wird eine Prüfgrube ausgehoben. Die Nullmessung wird auf einer Stahlplatte durchgeführt. Das Volumen der Prüfgrube in Bezug auf die ebene Fläche wird von allen mittels Densitometer und abschließend mit einem Sandersatzverfahren bestimmt. Nach jeder Messung wird das Volumen ebenfalls photogrammetrisch festgehalten.

Abb. 13 zeigt die geplante Versuchsanordnung auf dem Probefeld. Das Probefeld wird hierfür in zwei Hälften geteilt. Es werden je 2 Labors zeitgleich die Versuche durchführen. Jedem Labor steht ein Bereich von 2x3 m zur Verfügung. „Außen“ sollen die Tragfähigkeitsuntersuchungen mittels dynamischen- und statischen Lastplattenversuch stattfinden und „innen“ die In-situ-Dichtebestimmungen. Die Lage der statischen Lastplattenversuche und der Ersatzverfahren wird fixiert mit einem Abstand von einem Meter. Die Lage der dynamischen Lastplatten- bzw. Sondenversuche kann selbst gewählt werden.

Die Nummerierung der Prüffelder beschreibt die chronologische Abfolge der Labors und entspricht nicht der zugeteilten Nummerierung.

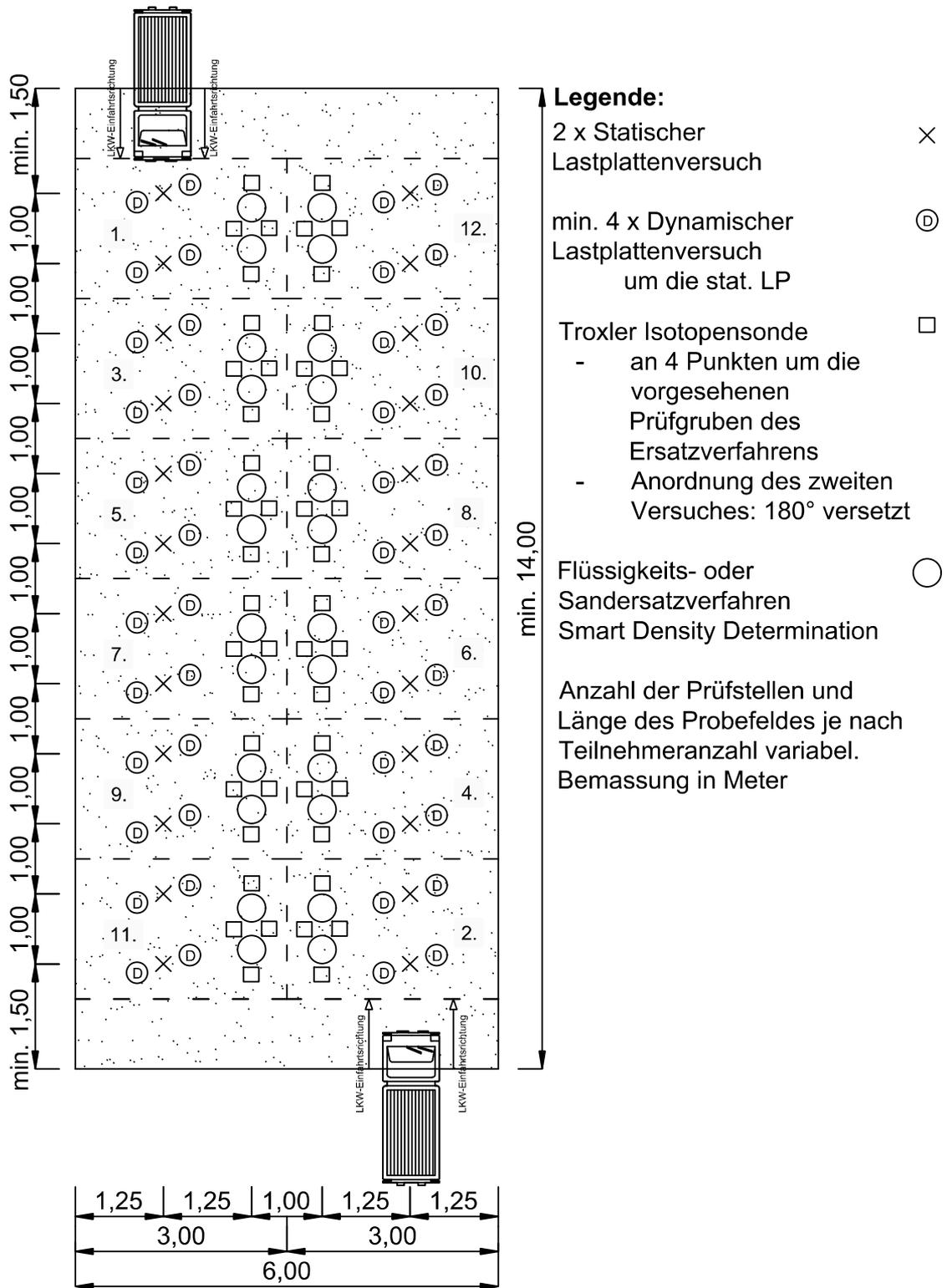


Abb. 13: Prinzipskizze, Versuchsanordnung am Probefeld, Hauptversuch

### 3.10 Anmerkungen zur Durchführung (Hauptversuch)

Das Wetter am Versuchstag war sonnig bei etwa 24 °C. Wie auch beim Vorversuch kann es zu Schwankungen des Wassergehaltes aufgrund der Austrocknung der Oberfläche kommen.

- Aus Platzgründen wurde von der Planung abgewichen und die In-situ-Dichtebestimmungen am Probefeld außerhalb der Tragfähigkeitsuntersuchungen durchgeführt.
- Bei der Versuchsdurchführung der Statischen Lastplatte wurde darauf geachtet Erschütterungen durch z.B. Eintreiben des Einstichdornes der Troxler Isotopsonde in der Nähe der Prüfeinrichtung zu vermeiden.
- Außerdem wurde die Fahrtrichtung der LKW geändert, um einen raschen Ablauf der Versuchsabfolge zu gewährleisten.
- Die Wasserersatzverfahren wurden von allen Labors außer Labor 1 mit einem Densitometer durchgeführt.

In Abb. 14 ist die tatsächliche Versuchsanordnung auf dem Probefeld dargestellt. Dieser kann die Nummerierung der Prüffelder für die in Kapitel 4 beschriebene Auswertung der Prüfergebnisse entnommen werden. Wie in Kapitel 3.9 beschrieben werden die Versuche mit Labor 11 und Labor 3 gestartet.

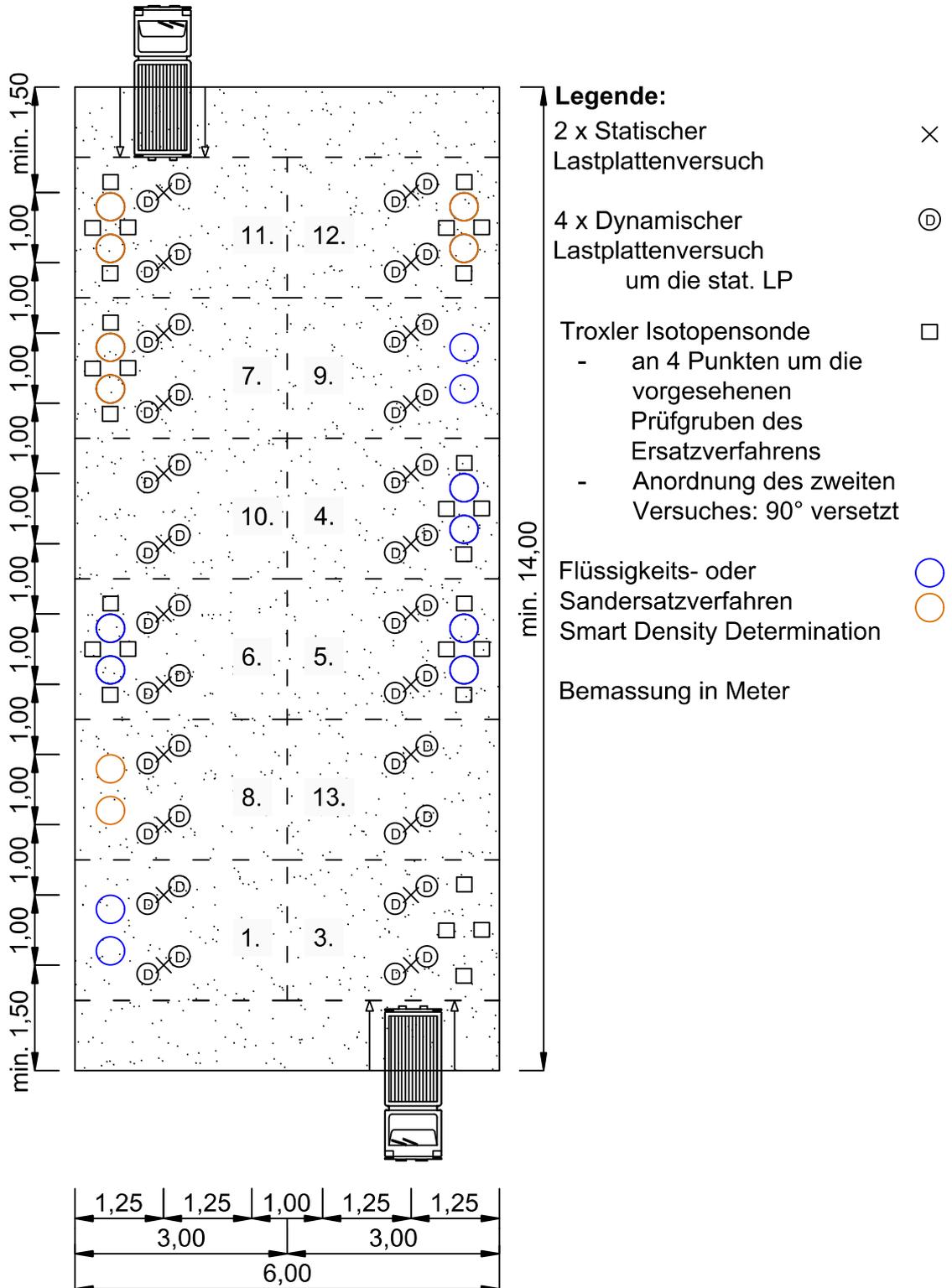


Abb. 14: tatsächliche Versuchsanordnung am Probefeld, Hauptversuch

## 4 Statistische Auswertung der Prüfergebnisse

### 4.1 Shapiro-Wilk-Test (vgl. R Documentation)

Die vorliegenden Messdaten wurden einer Analyse auf ihre Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests unterzogen.

Für den Test werden eine Nullhypothese ( $H_0$ ) und eine Alternativhypothese ( $H_1$ ) aufgestellt.  $H_0$  besagt, dass die Daten normalverteilt sind, während  $H_1$  eine Normalverteilung ausschließt.

$H_0$  für  $p \geq 0,05$

$H_1$  für  $p < 0,05$

Daher, ergibt die Analyse eine Signifikanz  $p$  von kleiner 0,05 wird die Nullhypothese verworfen und es liegt keine Normalverteilung vor.

Die Funktion in R kann bei einer Datenanzahl von 3 bis 5000 angewendet werden.

### 4.2 Ausreißertest nach Grubbs (vgl. R Documentation)

Die normalverteilten Messdaten werden einem Ausreißertest nach Grubbs unterzogen. Hierbei können ein oder zwei Ausreißer auf einer Seite der Verteilung oder zwei Ausreißer mit je einem pro Seite erkannt werden. Der Test auf einen Ausreißer berechnet, ausgehend vom Mittelwert, die Wertung der Messdaten (Messwert minus Mittelwert dividiert durch die Standardabweichung dieser Wertung) und vergleicht diese mit dem kritischen Wert.

Der zweite Test untersucht den höchsten und niedrigsten Wert der Messreihe auf Ausreißer. Dafür wird das Verhältnis dieser zur Standardabweichung ermittelt.

Der dritte Test berechnet das Verhältnis der Varianzen der gesamten Messreihe und der Messreihe ohne den zwei Extremwerten auf einer Seite der Verteilung.

Für den Test werden eine Nullhypothese ( $H_0$ ) und eine Alternativhypothese ( $H_1$ ) aufgestellt.  $H_0$  besagt, dass kein Ausreißer vorliegt, während  $H_1$  das Vorliegen eines Ausreißers annimmt.

$H_0$  für  $p \geq 0,05$

$H_1$  für  $p < 0,05$

### 4.3 Dichtefunktion (vgl. Silverman, 2002)

Zur Veranschaulichung der Messdaten wurde aus diesen eine Dichtefunktion erstellt. Zusätzlich wird in den Diagrammen die Standardabweichung, der Median, das arithmetische Mittel, das geometrische Mittel und der Modus dargestellt.

Als Vergleichskurve wurde eine Normalverteilungskurve mit dem errechneten arithmetischen Mittel in das Diagramm gelegt.

Die Normalverteilung hat eine Dichte von

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (15)$$

wobei  $\mu$  den Mittelwert der Verteilung und  $\sigma$  die Standardabweichung beschreibt.

Die Dichtefunktion wird als Gaußschen Kerndichteschätzer berechnet. In dieser Schätzung wird die Gewichtung  $w$  durch die Kerndichtefunktion  $K$ , welche die Bedingung aus Gleichung 16 erfüllt, ersetzt.

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx = 1 \quad (16)$$

Diese Kerndichtefunktion ist meist eine symmetrische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wie zum Beispiel die Normalverteilung. Daraus ergibt sich eine Verteilungsfunktion (Gleichung 17). Der Parameter  $h$  wird als Wert zur Glättung dieser eingeführt (in weiterer Folge als Bandbreite bezeichnet).

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (17)$$

Der Kerndichteschätzer ist nun eine Summe einzelner Kurven jedes Messwertes. Die Kerndichtefunktion beschreibt die Form der Kurven und  $h$  beschreibt die Breite dieser. In Abb. 15 sind die einzelnen Kurven und die mit Aufsummierung konstruierte Kerndichtefunktion dargestellt.

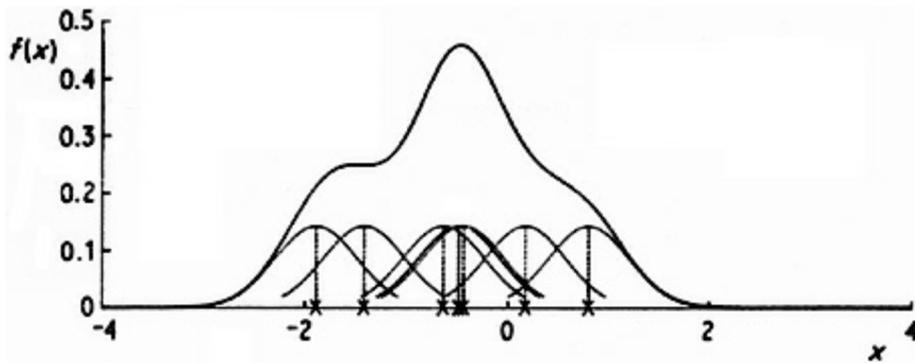


Abb. 15: Kerndichtfunktion (Silverman, 2002)

Zur Veranschaulichung des Einflusses der Bandbreite  $h$  werden in Abb. 16 die Kerndichtfunktionen mit einer Bandbreite von 0,2 bzw. 0,8 dargestellt. Geht  $h$  gegen 0 werden die Einzelkurven sehr „spitz“ und somit auch die daraus konstruierte Dichtefunktion sehr detailliert. Wird hingegen die Bandbreite größer angesetzt werden die Kurven flach und die gesamte Dichtefunktion geglättet.

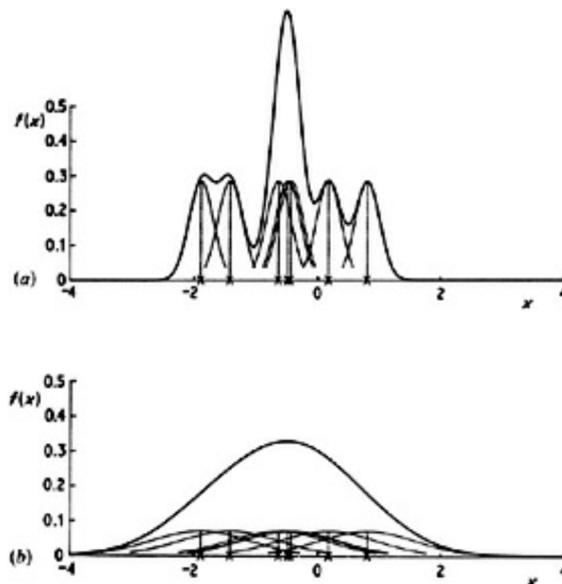


Abb. 16: Bandbreite (a) 0,2 und (b) 0,8 (Silverman, 2002)

## 5 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Auswertungsdiagramme der Prüfergebnisse beider Probefelder dargestellt und analysiert (Messergebnisse siehe Anhang B - F). Die statistische Auswertung wurde unter zur Hilfenahme des Computerprogrammes R (Version 3.5.1, The R Foundation for Statistical Computing) durchgeführt.

Die Messdaten werden mittels Shapiro-Wilk-Test auf ihre Normalverteilung überprüft. Im Anschluss wird der Ausreißertest nach Grubbs angewendet.

Zur Veranschaulichung der Messergebnisse wird die Dichtefunktion dieser dargestellt. In den Funktionsdiagrammen werden außerdem die Grenzen der Standardabweichung, das arithmetische Mittel, der Median und der Modus dargestellt. Zusätzlich wird die Verteilung der Ergebnisse anhand eines Box-Plots veranschaulicht. Die im Box-Plot als Punkt dargestellten Messwerte werden in weiterer Folge als Extremwerte bezeichnet. (Abb. 17, Abb. 18, Abb. 19, Abb. 20, Abb. 22, Abb. 24, Abb. 26, Abb. 27, Abb. 32, Abb. 33, Abb. 34, Abb. 35, Abb. 37, Abb. 39, Abb. 41, Abb. 42, Abb. 43, Abb. 44, Abb. 46, Abb. 48, Abb. 58)

Aufgrund der großen Anzahl an Messwerten wurden für den Hauptversuch ergänzend Punktdiagramme erstellt und die Verteilung der Ergebnisse jedes Labors beschrieben. Hierfür wurden auf der Ordinate die Labornummern aufgetragen, auf der Abszisse die jeweiligen Messwerte. Auf eine Darstellung der Mittelwerte wurde aufgrund des Verlusts der Aussagekraft über die Präzision des einzelnen Versuchs verzichtet. (Abb. 28)

Zusätzlich stellen Plots über die Lage der Versuchsanordnung den Verlauf entlang des Probefeldes dar. Auf den beiden Abszissen werden jeweils die Versuchsnummern einer Probefeldseite aufgetragen. Die Versuchsergebnisse werden auf der Ordinate aufgezeichnet. Eine lineare Trendlinie je Messreihe beschreibt den Verlauf der Messergebnisse entlang des Probefeldes. Der chronologische Ablauf der Versuche startet bei Messreihe A mit Labornummer 11 und endet mit Labornummer 1. Die Messreihe B wurde in die Gegenrichtung mit Labornummer 3 gestartet und mit Labornummer 12 beendet. (Abb. 21, Abb. 23, Abb. 25, Abb. 29, Abb. 36, Abb. 38, Abb. 40, Abb. 45, Abb. 47, Abb. 49)

Zur Darstellung der Korrelation zweier Versuchsauswertungen wurden Punktdiagramme erstellt. Auf der Abszisse und der Ordinate wurden jeweils die Messwerte eines Versuches aufgetragen. Die Achsen wurden hierfür gleich skaliert. Bei mehreren Versuchsdurchführungen je Labor und Versuch wurden die Ergebnisse mit einem Balken dargestellt. (Abb. 30, Abb. 31, Abb. 50, Abb. 51, Abb. 52, Abb. 53, Abb. 54, Abb. 55, Abb. 56, Abb. 57)

## 5.1 Statischer Lastplattenversuch

### 5.1.1 Vorversuch

#### Elastischer Verformungsmodul Erstbelastung

Die statistische Auswertung für den Elastischen Verformungsmodul des Erstbelastungsastes ist in Abb. 17 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 50 und 74 MN/m<sup>2</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 60 MN/m<sup>2</sup>.

Der Median wurde mit 56 MN/m<sup>2</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 8,4 MN/m<sup>2</sup>.

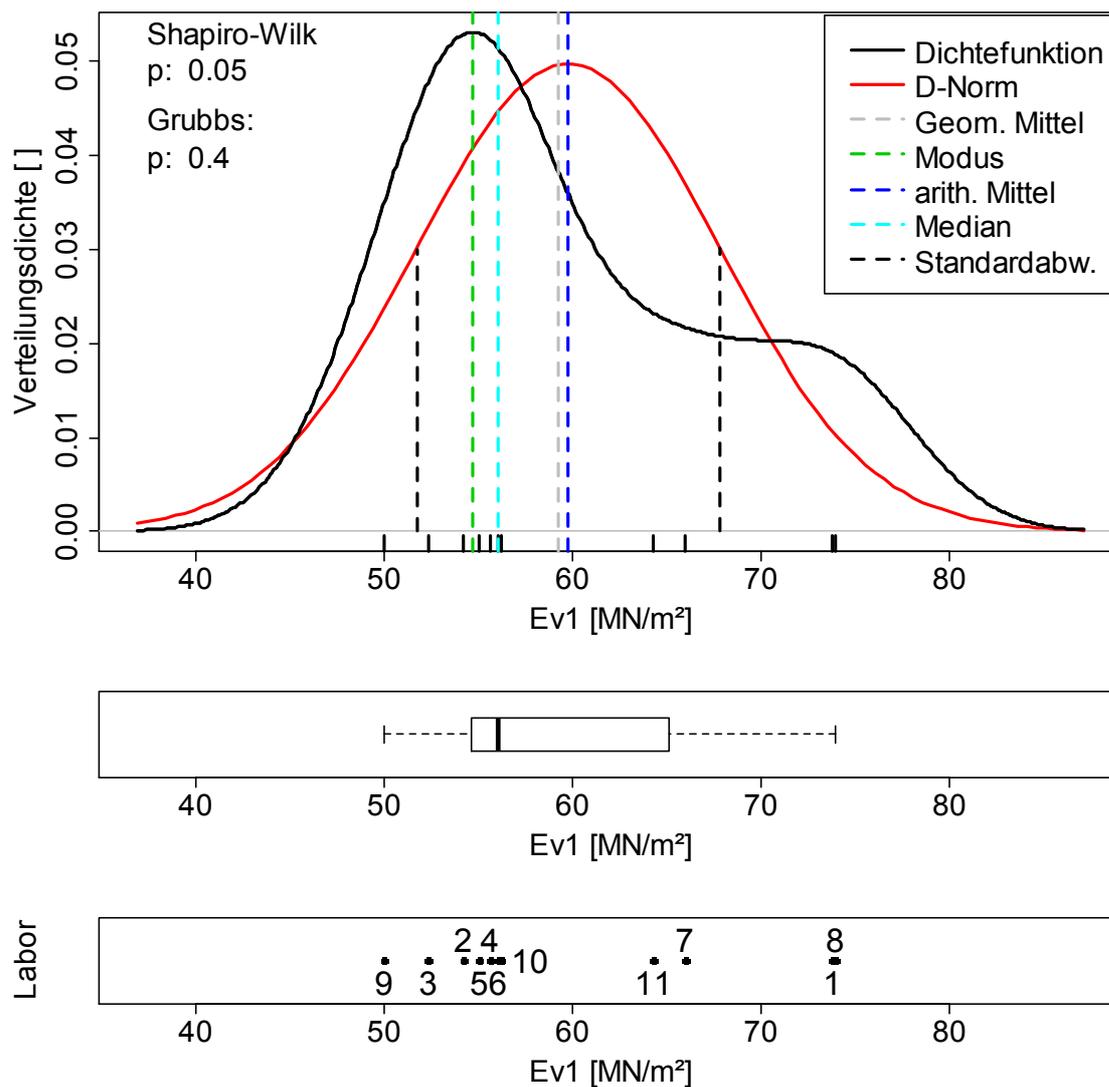


Abb. 17: Dichtefunktion  $E_{v1}$ , Vorversuch

### Elastischer Verformungsmodul Zweitbelastung

Die statistische Auswertung für den Elastischen Verformungsmodul des Zweitbelastungsastes ist in Abb. 18 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 161 und 250 MN/m<sup>2</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 195 MN/m<sup>2</sup>.

Der Median wurde mit 188 MN/m<sup>2</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 24,9 MN/m<sup>2</sup>.

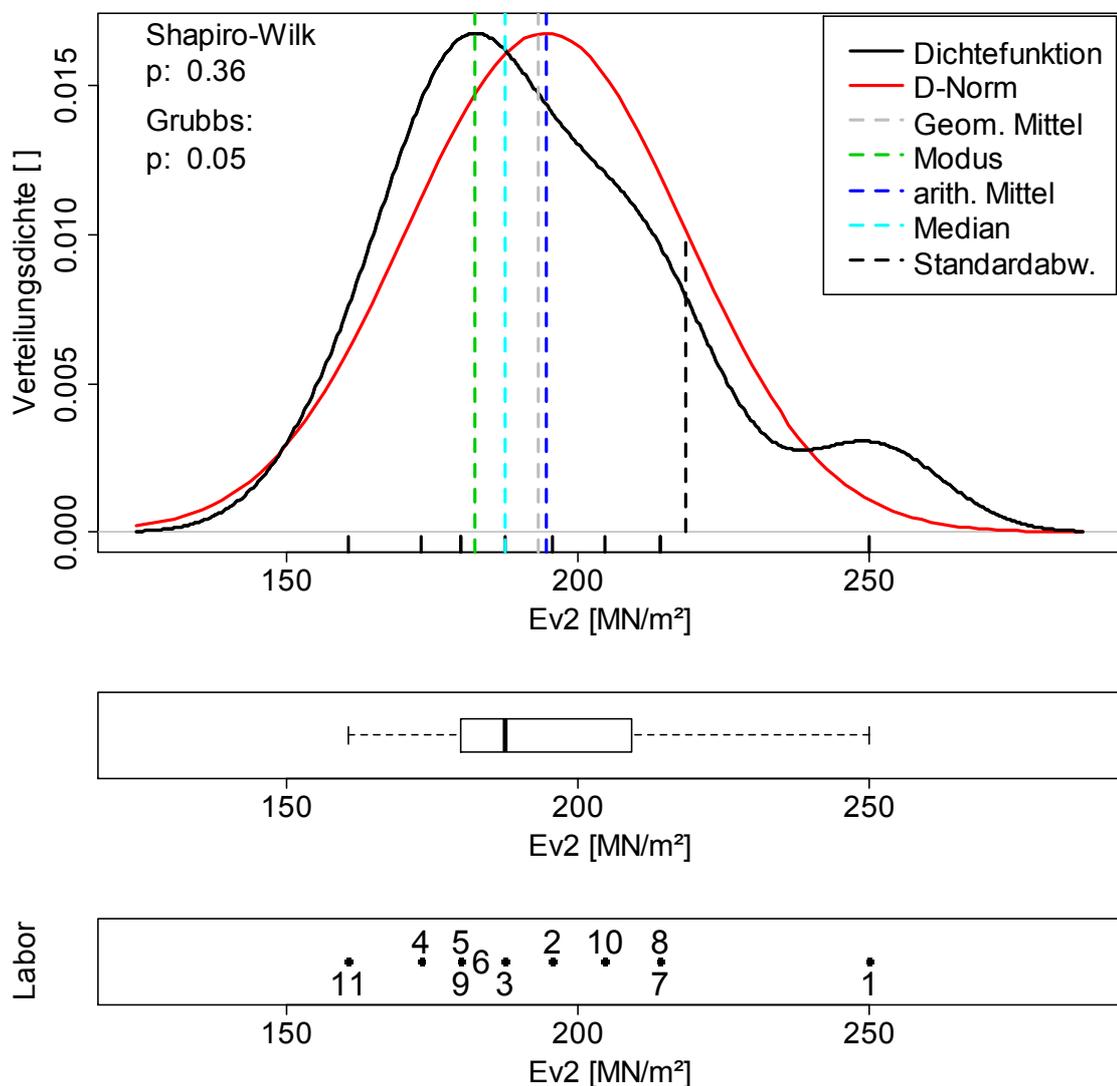


Abb. 18: Dichtefunktion  $E_{v2}$ , Vorversuch

## Verdichtungsmaß $E_{v2}/E_{v1}$

Die statistische Auswertung für das Verdichtungsmaß ist in Abb. 19 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,5 und 3,6. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Das Ergebnis von Labor 11 wurde als Extremwert bestimmt.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 3,3.

Der Median wurde ebenfalls mit 3,3 berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,4.

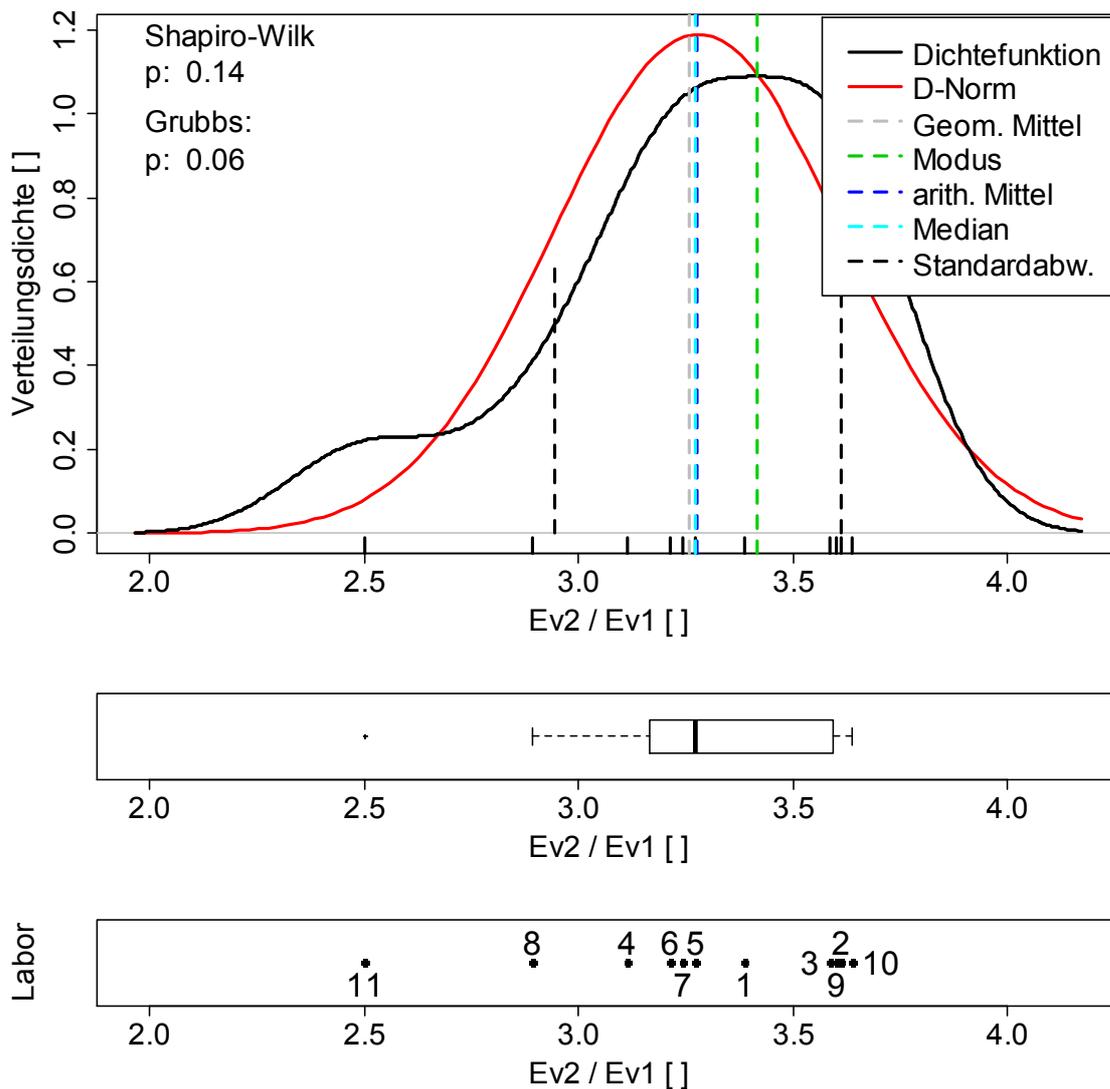


Abb. 19: Dichtefunktion  $E_{v2}/E_{v1}$ , Vorversuch

## 5.1.2 Hauptversuch

### Elastischer Verformungsmodul Erstbelastung

Die statistische Auswertung für den Elastischen Verformungsmodul des Erstbelastungsastes ist in Abb. 20 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 42 und 102  $\text{MN/m}^2$ . Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa  $74 \text{ MN/m}^2$ .

Der Median wurde mit  $76 \text{ MN/m}^2$  berechnet und die Standardabweichung liegt bei  $14,2 \text{ MN/m}^2$ .

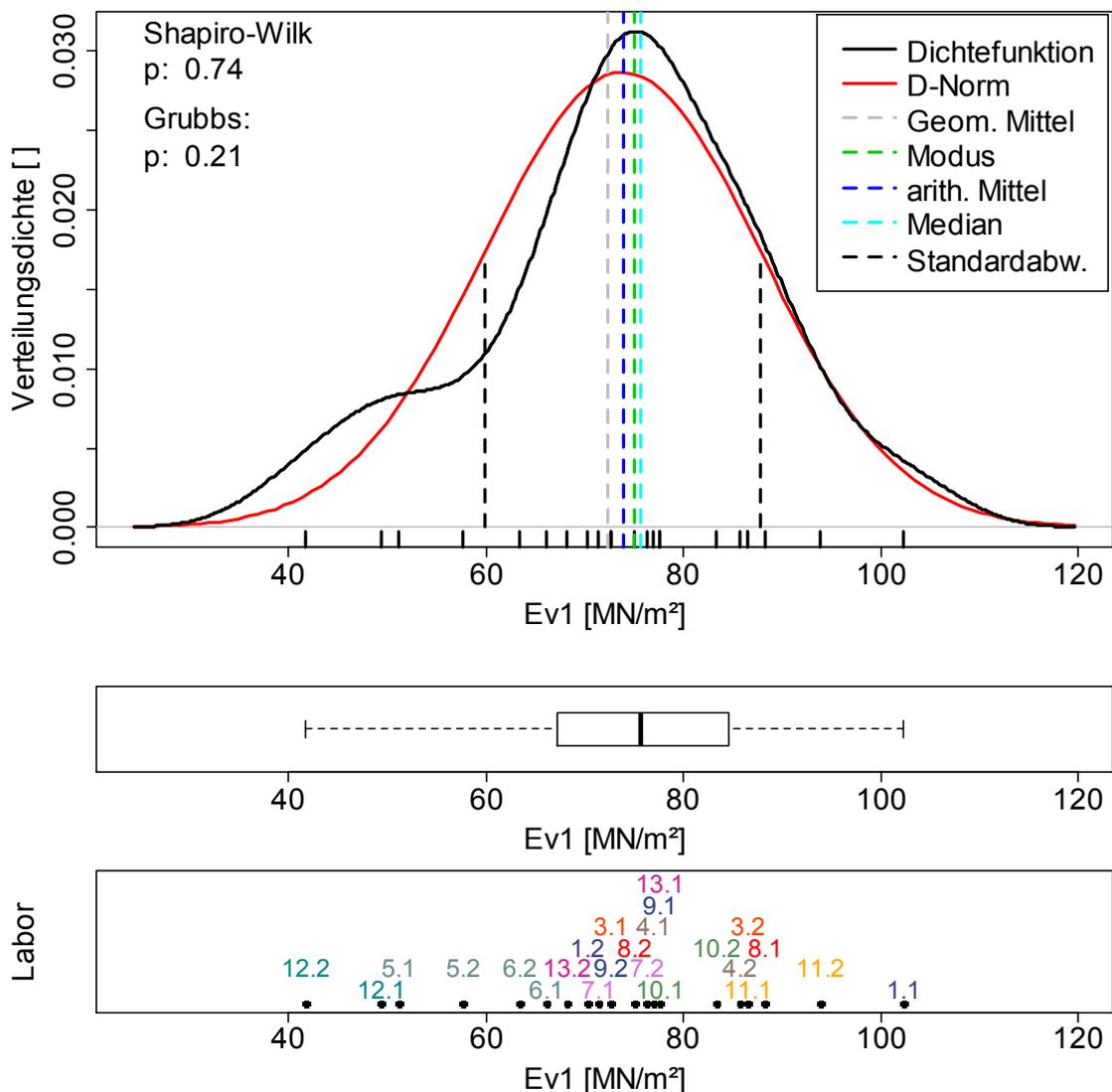


Abb. 20: Dichtefunktion  $E_{v1}$ , Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 21 dargestellt.

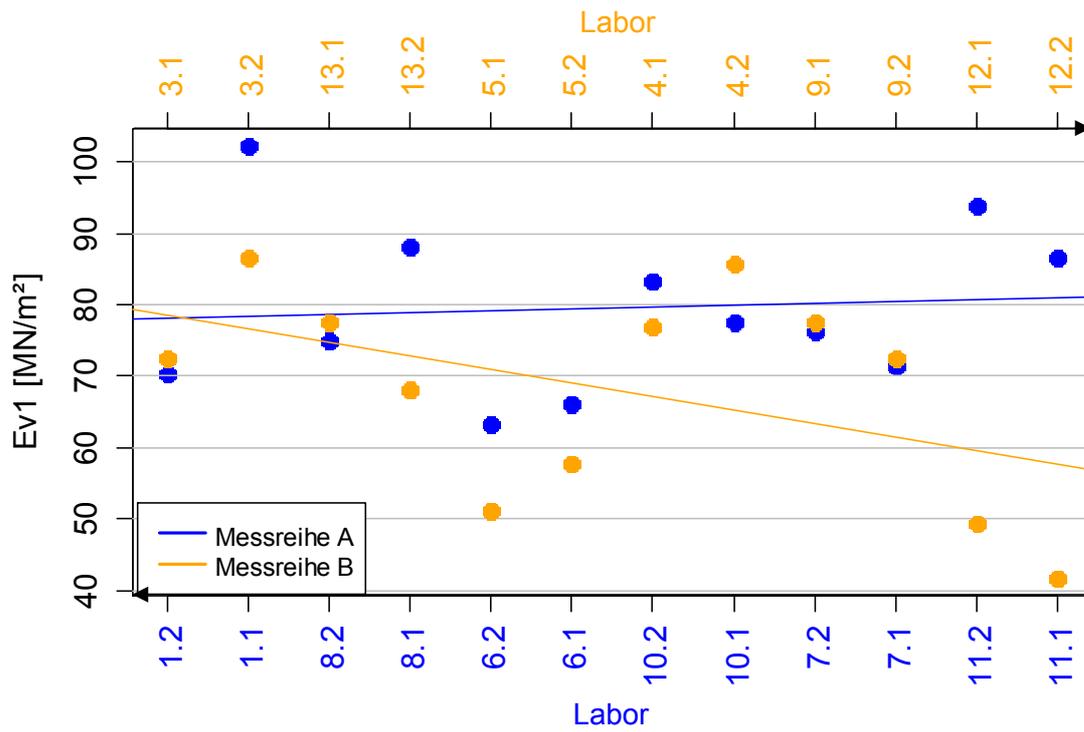


Abb. 21: geometrischer Zusammenhang  $E_{v1}$ , Hauptversuch

## Elastischer Verformungsmodul Zweitbelastung

Die statistische Auswertung für den Elastischen Verformungsmodul des Zweitbelastungsastes ist in Abb. 21 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 136 und 250 MN/m<sup>2</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Die Ergebnisse von Labor 12 wurden als Extremwerte bestimmt.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 209 MN/m<sup>2</sup>.

Der Median wurde mit 214 MN/m<sup>2</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 28,2 MN/m<sup>2</sup>.

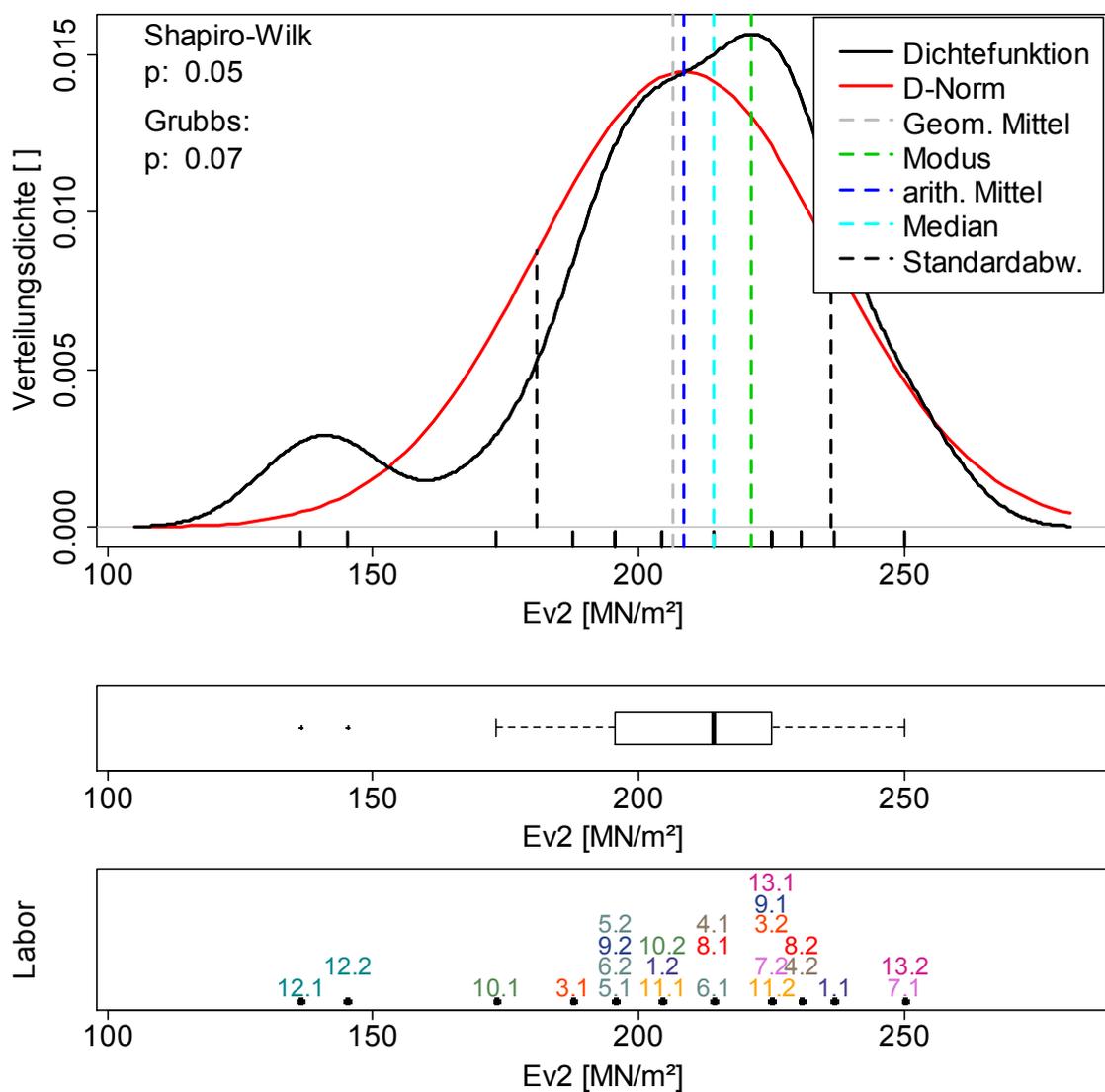
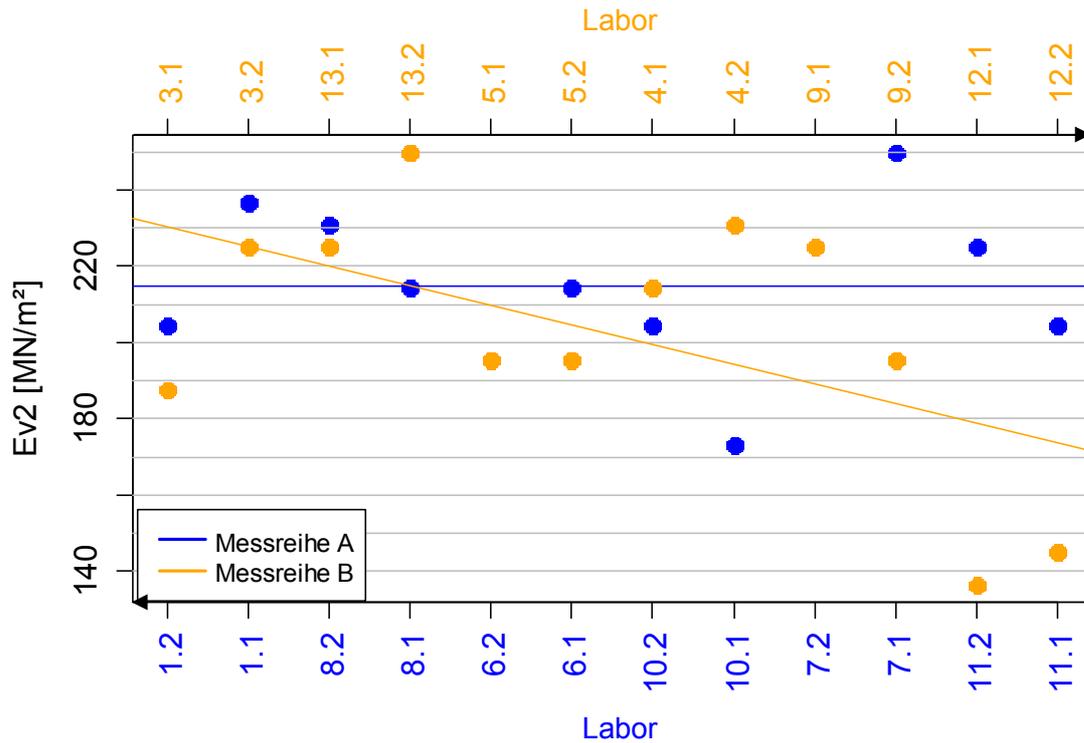


Abb. 22: Dichtefunktion  $E_{v2}$ , Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 23 dargestellt.



Die Messwerte von 9.1 und 7.2 bzw. 5.1 und 6.2 überdecken sich aufgrund gleicher Messwerte.

**Abb. 23:** geometrischer Zusammenhang  $E_{v2}$ , Hauptversuch

### Verdichtungsmaß $E_{v2}/E_{v1}$

Die statistische Auswertung für das Verdichtungsmaß ist in Abb. 24 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,2 und 3,8. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,9.

Der Median wurde mit 2,8 berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,4.

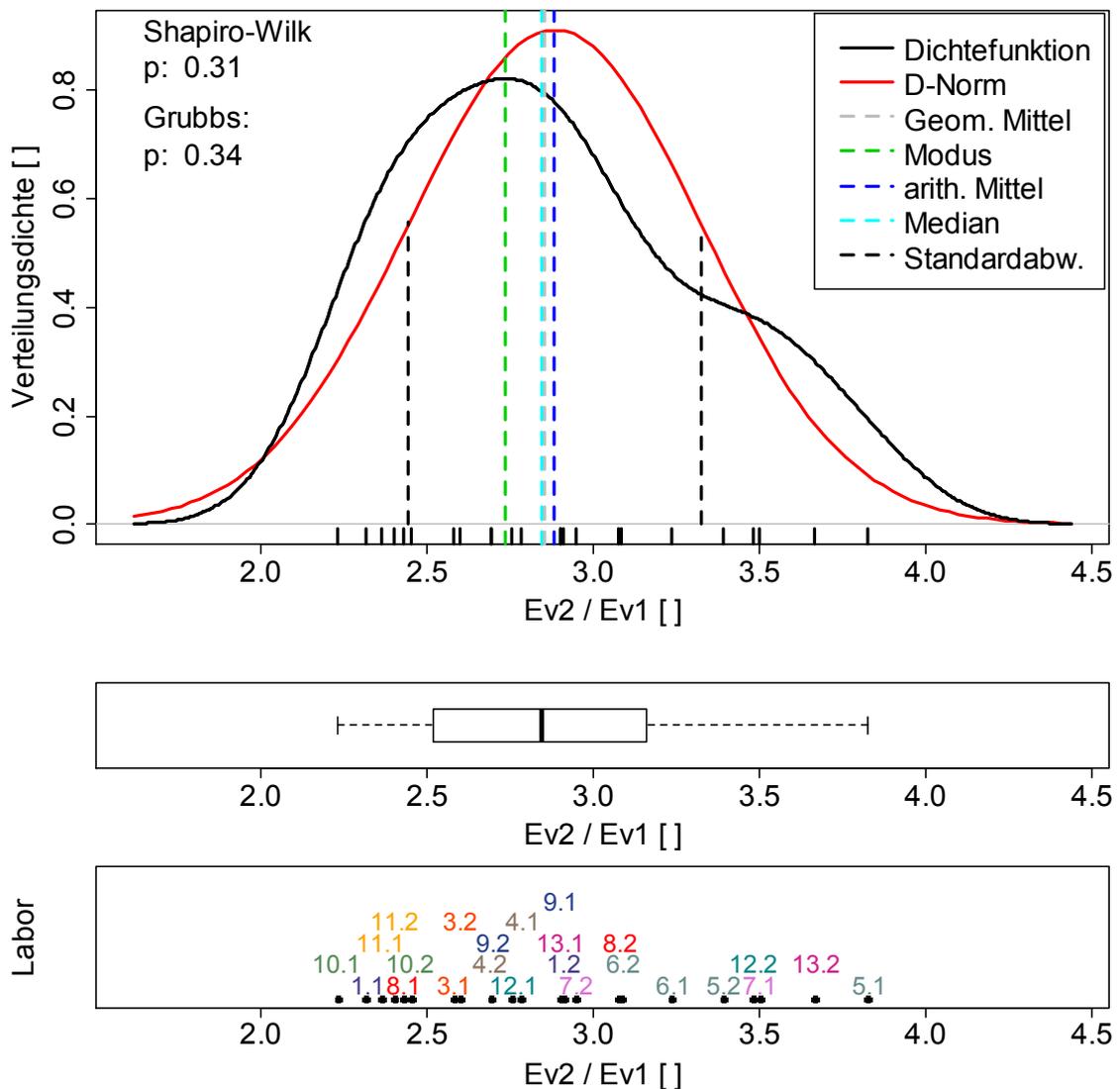


Abb. 24: Dichtefunktion  $E_{v2}/E_{v1}$ , Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 25 dargestellt.

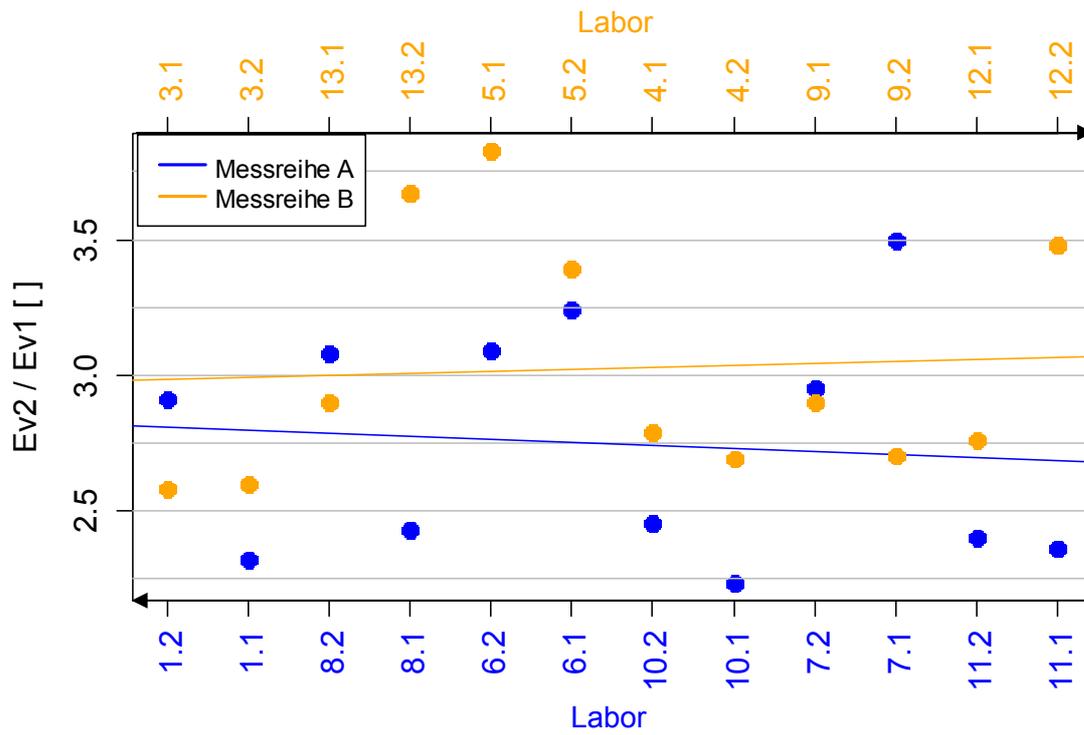


Abb. 25: geometrischer Zusammenhang  $E_{v2}/E_{v1}$ , Hauptversuch

## 5.2 Dynamischer Lastplattenversuch

### 5.2.1 Vorversuch

Die statistische Auswertung für den Dynamischen Verformungsmodul ist in Abb. 26 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 43 und 66 MN/m<sup>2</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Die Ergebnisse von Labor 1 und 5 wurden als Extremwerte bestimmt. Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 52 MN/m<sup>2</sup>.

Der Median wurde mit 50 MN/m<sup>2</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 6,7 MN/m<sup>2</sup>.

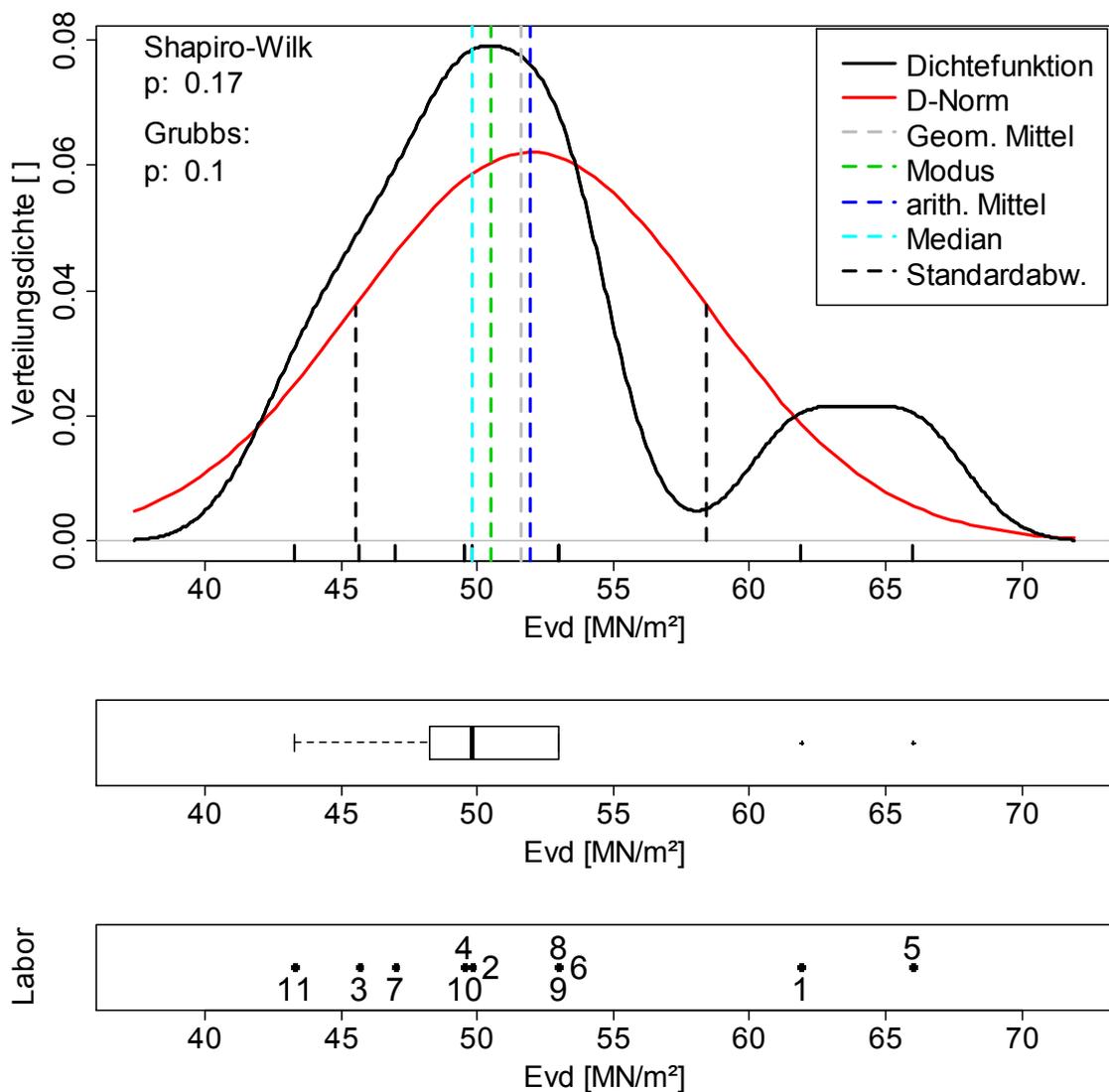


Abb. 26: Dichtefunktion  $E_{vd}$ , Vorversuch

## 5.2.2 Hauptversuch

Die statistische Auswertung für den Dynamischen Verformungsmodul ist in Abb. 27, Abb. 28 und Abb. 29 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 49 und 83  $\text{MN/m}^2$ . Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa  $64 \text{ MN/m}^2$ .

Der Median wurde mit  $63 \text{ MN/m}^2$  berechnet und die Standardabweichung liegt bei  $8,9 \text{ MN/m}^2$ .

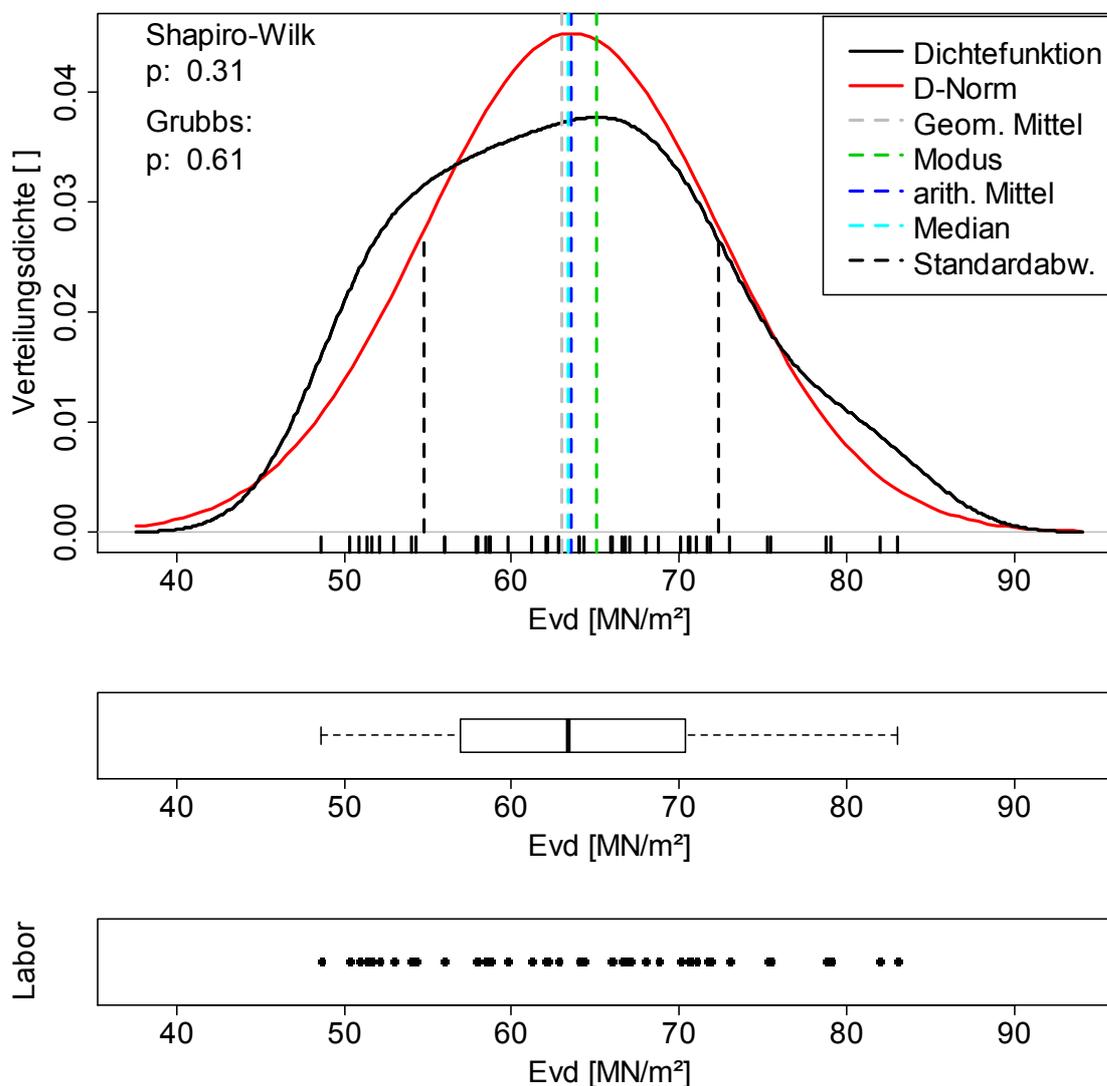


Abb. 27: Dichtefunktion  $E_{vd}$ , Hauptversuch

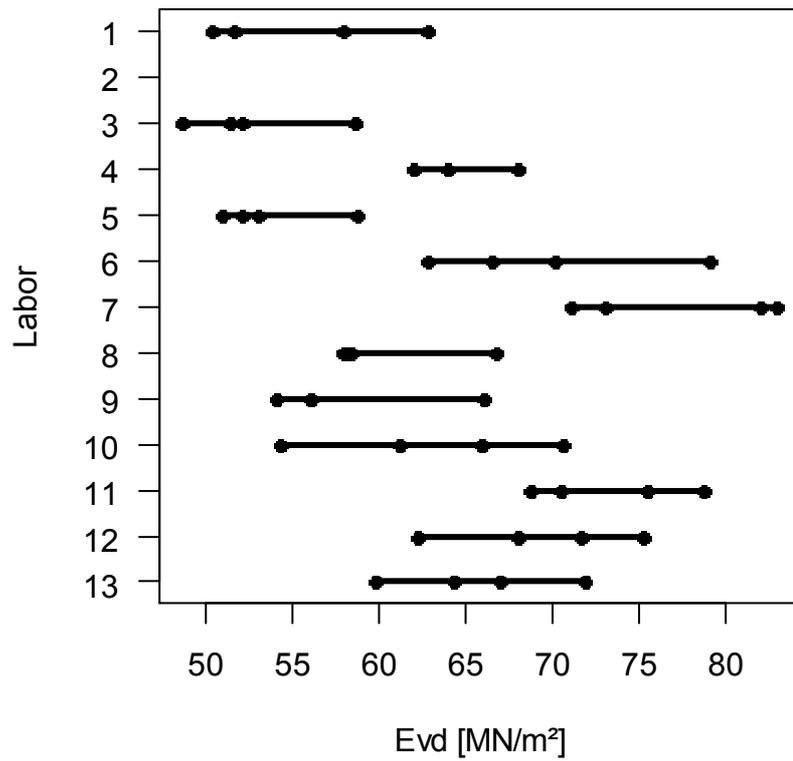


Abb. 28: Punktdiagramm E<sub>vd</sub>, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 29 dargestellt.

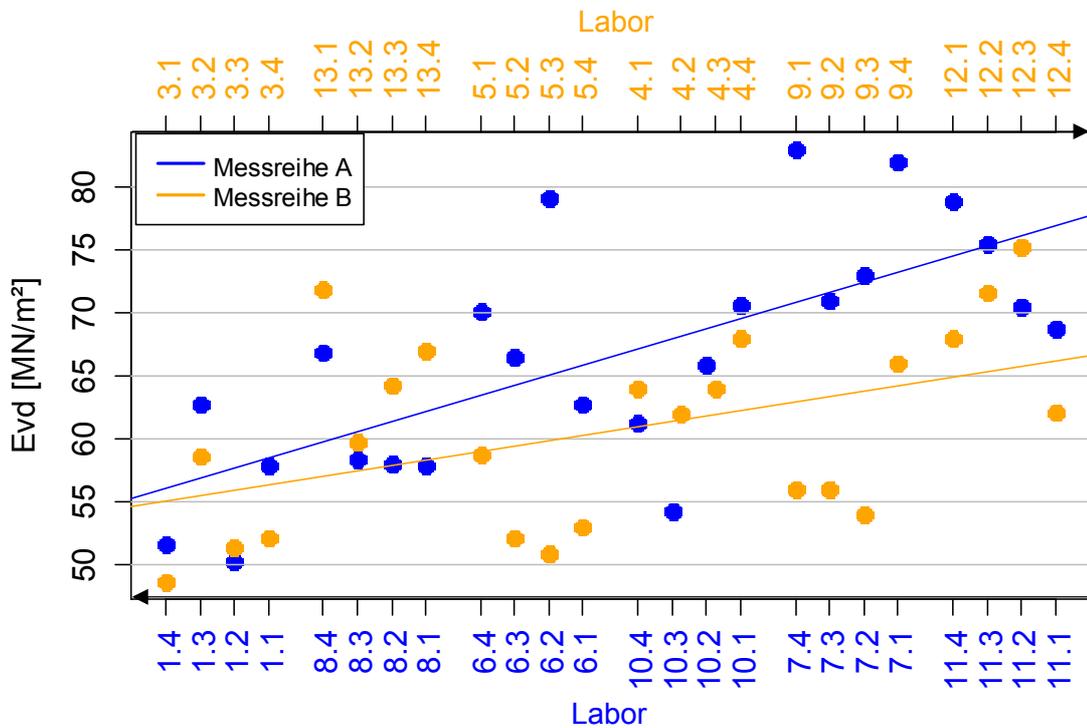


Abb. 29: geometrischer Zusammenhang E<sub>vd</sub>, Hauptversuch

## 5.3 Korrelation Statische und Dynamische Lastplatte

### 5.3.1 Vorversuch

Die Korrelation des Statischen Verformungsmoduls des Erstbelastungsastes mit dem Dynamischen Verformungsmodul ist in Abb. 30 dargestellt.

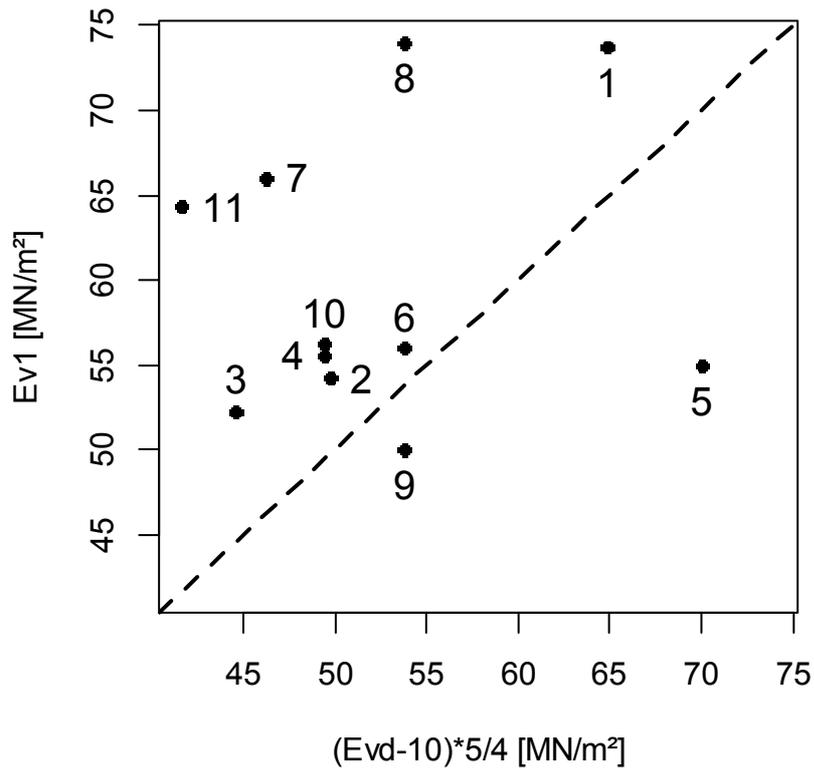
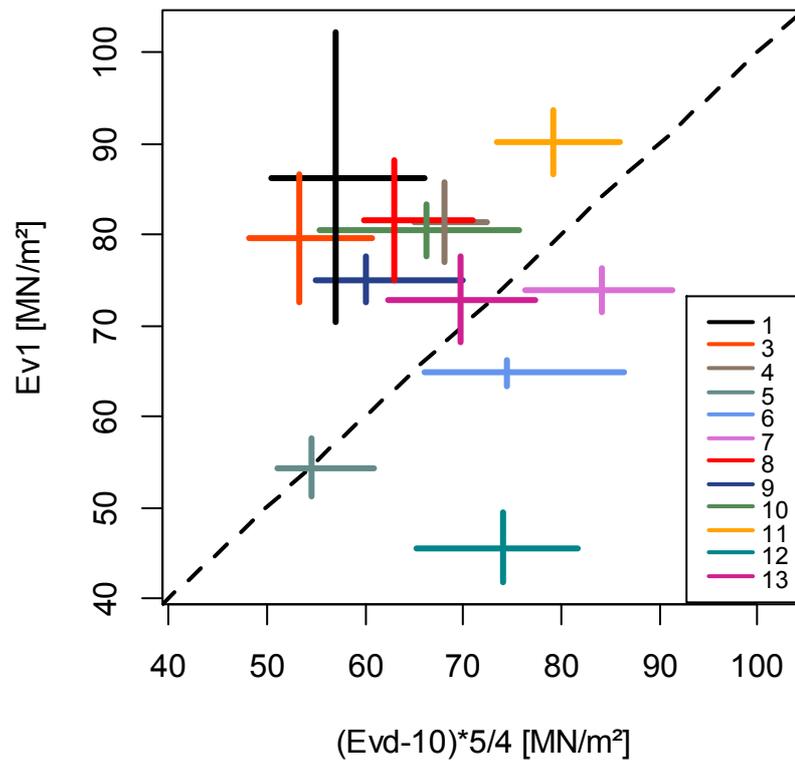


Abb. 30: Korrelation  $E_{v1}$  und  $E_{vd}$ , Vorversuch

### 5.3.2 Hauptversuch

Die Korrelation des Statischen Verformungsmoduls des Erstbelastungsastes mit dem Dynamischen Verformungsmodul ist in Abb. 31 dargestellt.



**Abb. 31:** Korrelation  $E_{v1}$  und  $E_{vd}$ , Hauptversuch

## 5.4 In-situ-Dichtebestimmung mit Troxler Isotopensonde

### 5.4.1 Vorversuch

#### Feuchtdichte

Die statistische Auswertung für die Feuchtdichte ist in Abb. 32 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,19 und 2,40 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Das Ergebnis von Labor 2 Versuch 3 wurde als Extremwert bestimmt. Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,28 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde ebenfalls mit 2,28 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,06 g/cm<sup>3</sup>.

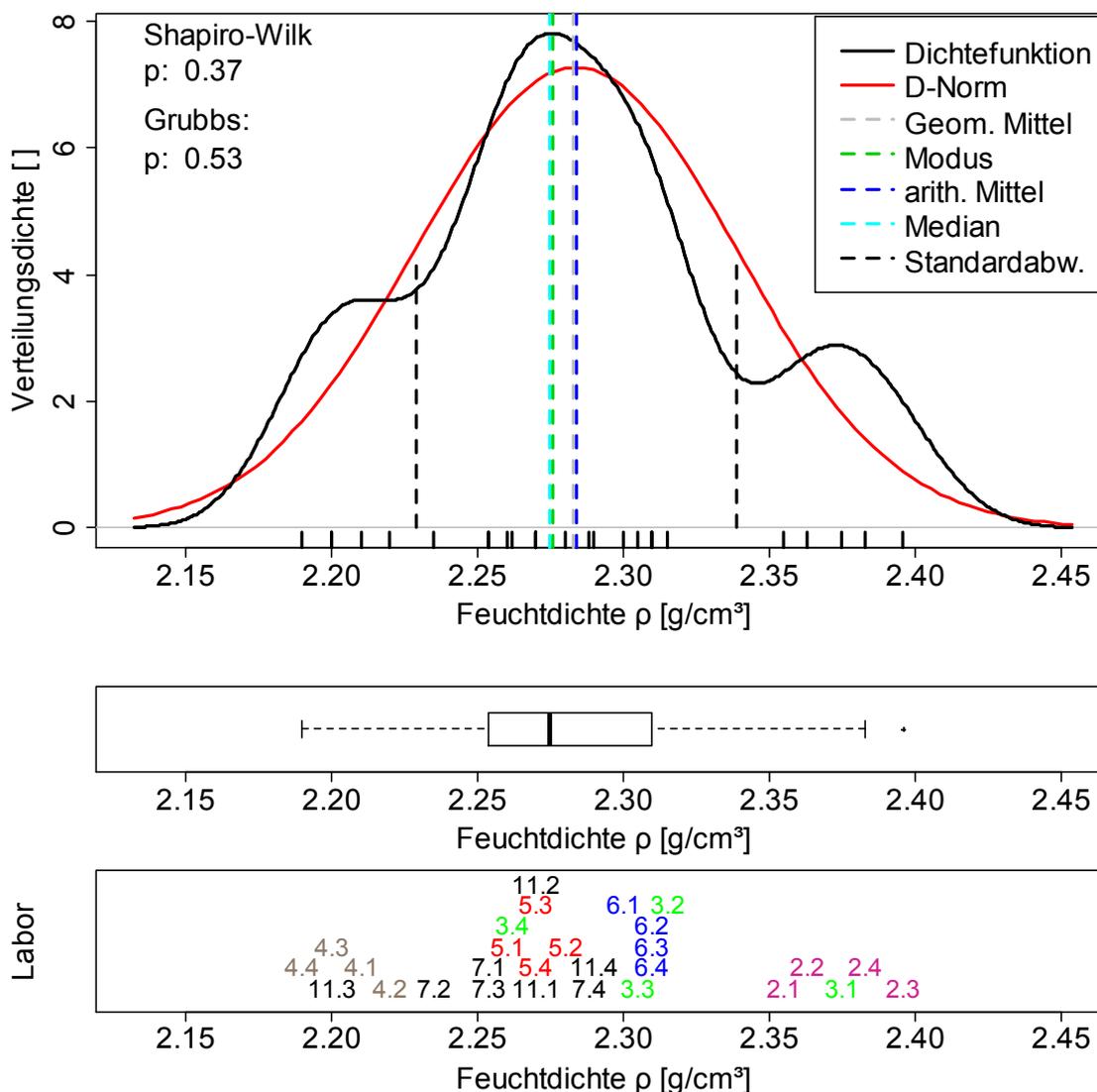


Abb. 32: Dichtefunktion Feuchtdichte mittels Troxler Isotopensonde, Vorversuch

## Trockendichte

Die statistische Auswertung für die Trockendichte ist in Abb. 33 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,12 und 2,33 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Das Ergebnis von Labor 2 Versuch 3 wurde als Extremwert bestimmt. Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,21 g/cm<sup>3</sup>. Der Median wurde ebenfalls mit 2,21 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,05 g/cm<sup>3</sup>.

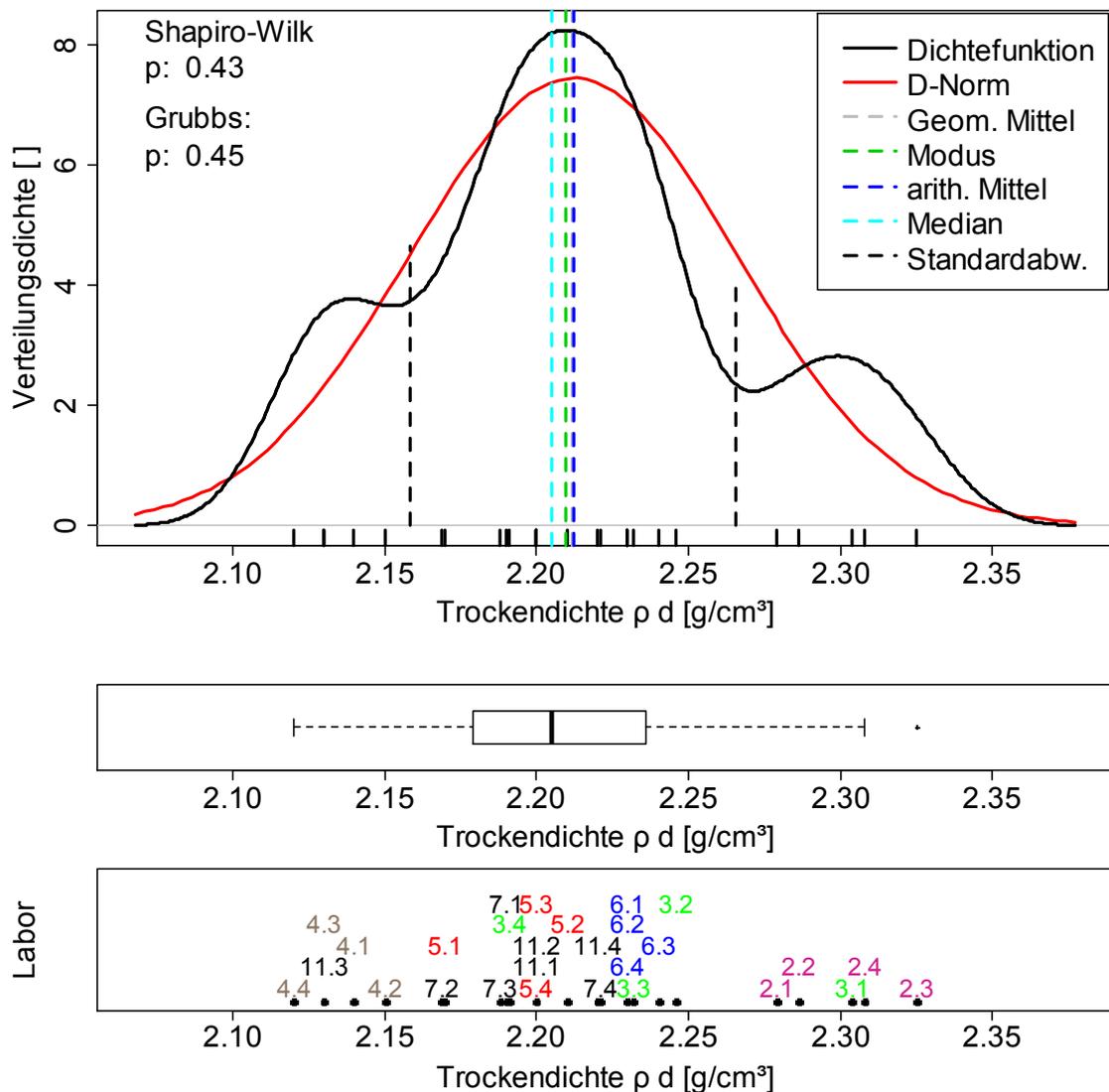


Abb. 33: Dichtefunktion Trockendichte mittels Troxler Isotopensonde, Vorversuch

## Wassergehalt

Die statistische Auswertung für den Wassergehalt ist in Abb. 34 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,9 und 4,2 M-%. Das Ergebnis von Labor 5 Versuch 1 wurde als Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 3,3 M-%.

Der Median wurde mit 3,2 M-% berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,3 M-%.

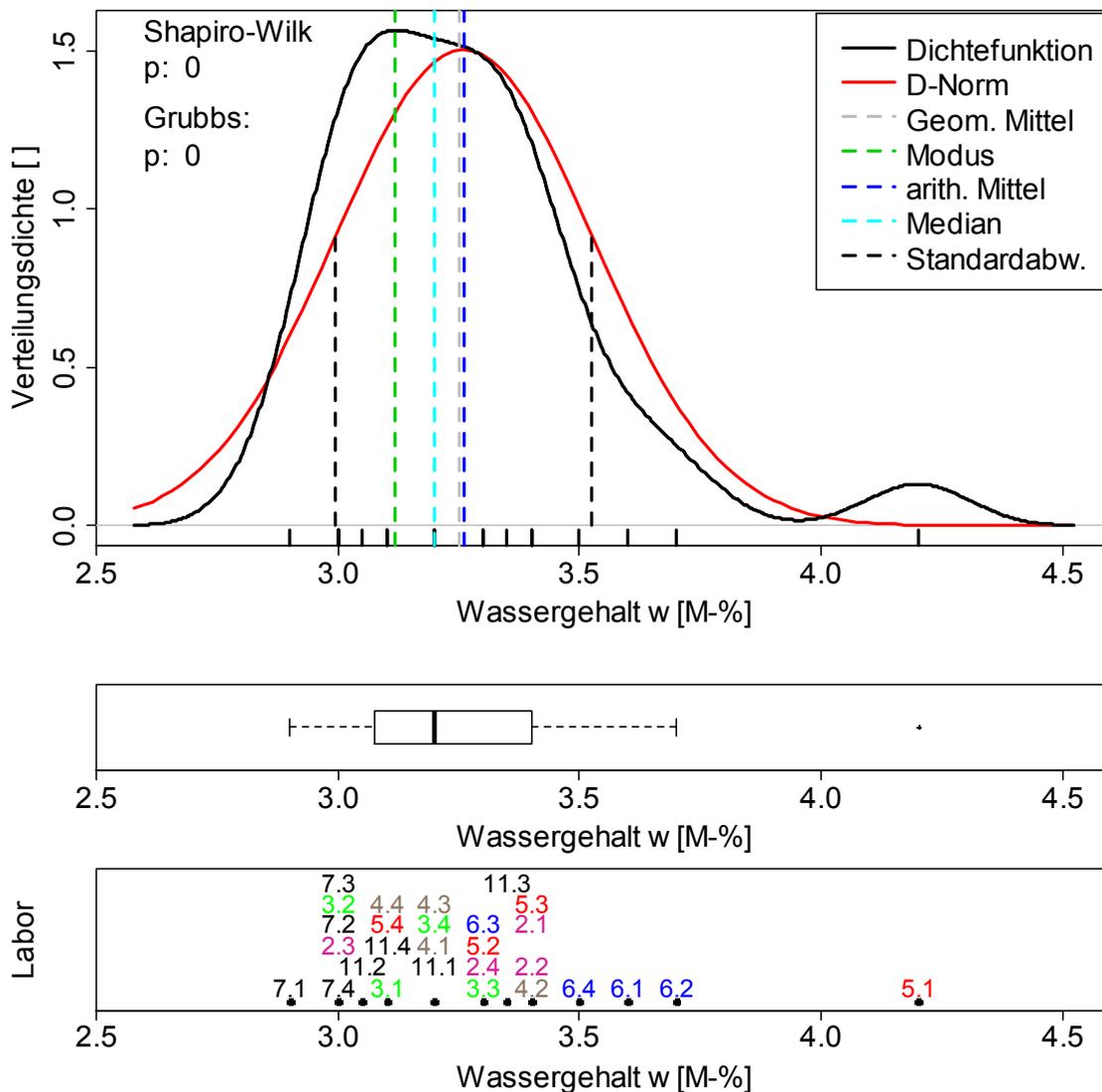


Abb. 34: Dichtefunktion Wassergehalt mittels Troxler Isotopensonde, Vorversuch

## 5.4.2 Hauptversuch

### Feuchtdichte

Die statistische Auswertung für die Feuchtdichte ist in Abb. 35 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,11 und 2,28 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,20 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde mit 2,21 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,05 g/cm<sup>3</sup>.

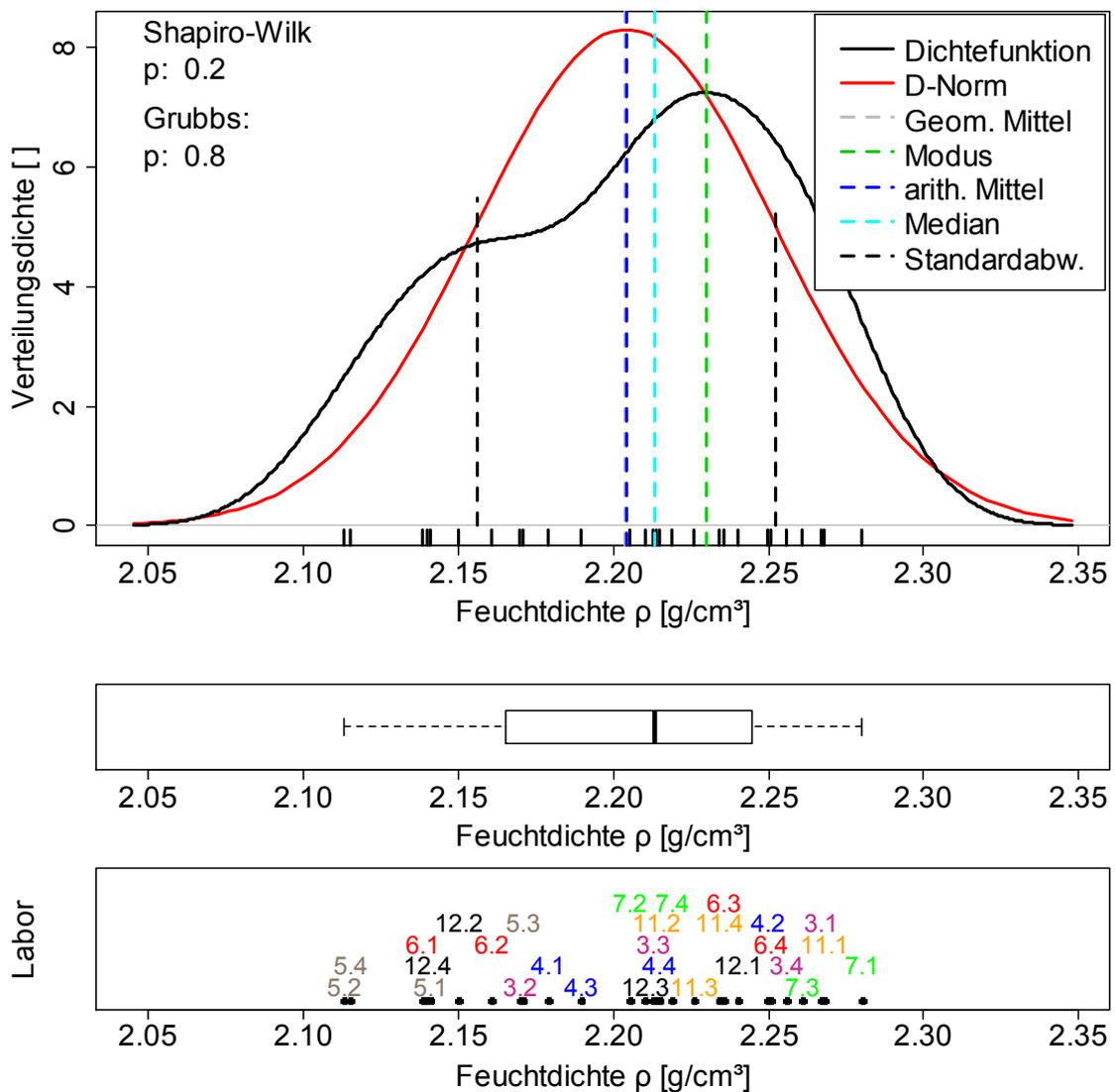


Abb. 35: Dichtefunktion Feuchtdichte mittels Troxler Isotopensonde, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 36 dargestellt.

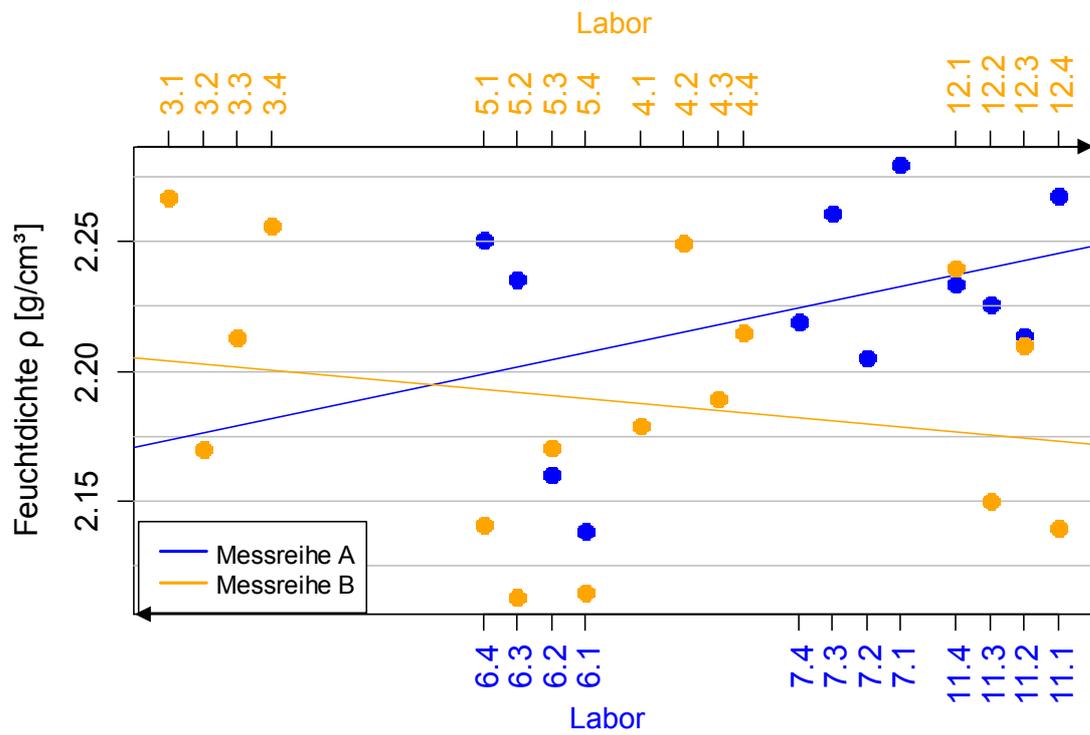


Abb. 36: geometrischer Zusammenhang Feuchtdichte mittels Troxler Isotopsonde, Hauptversuch

## Trockendichte

Die statistische Auswertung für die Trockendichte ist in Abb. 37 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,06 und 2,21 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,14 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde mit 2,15 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,05 g/cm<sup>3</sup>.

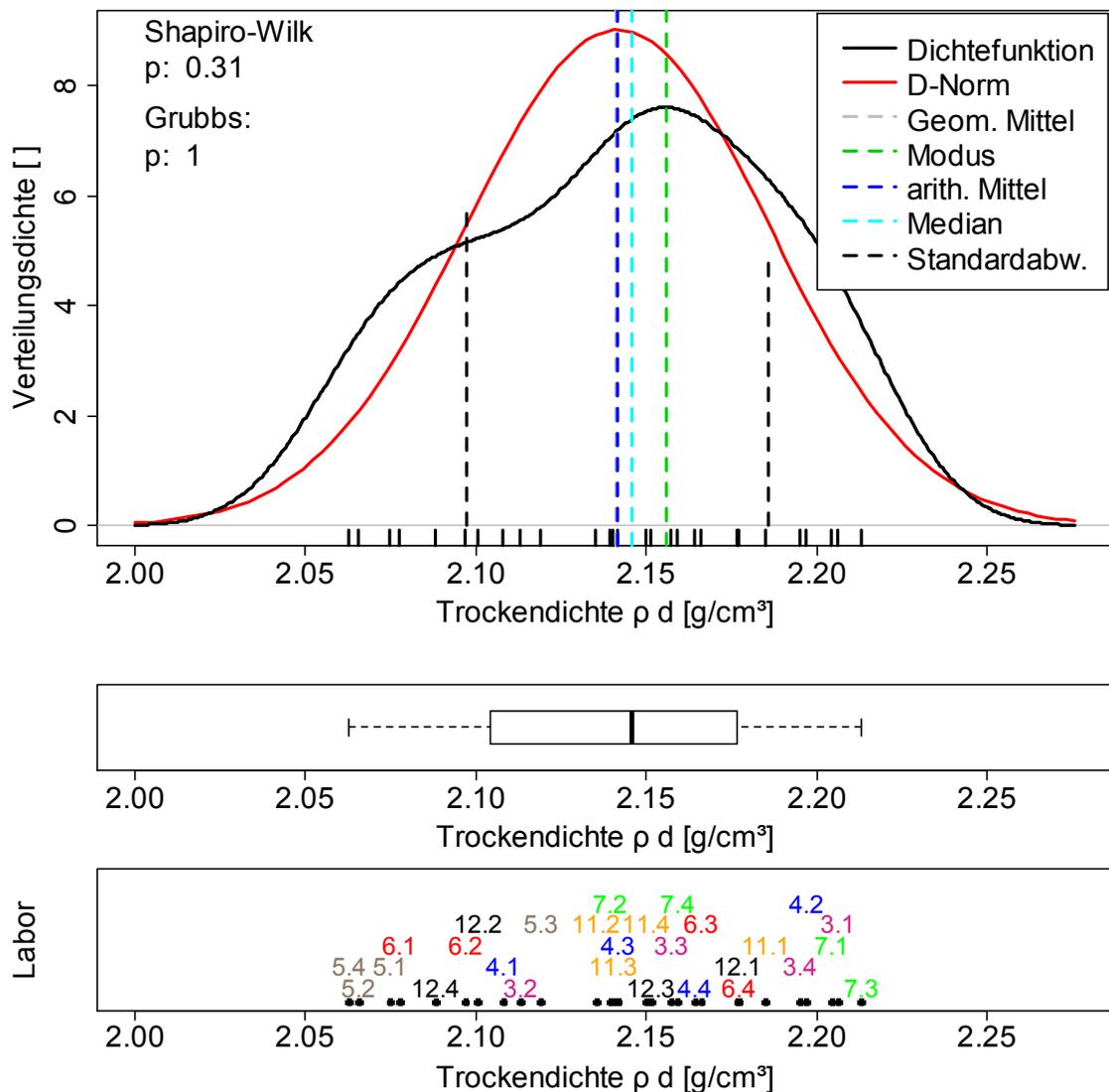


Abb. 37: Dichtefunktion Trockendichte mittels Troxler Isotopensonde, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 38 dargestellt.

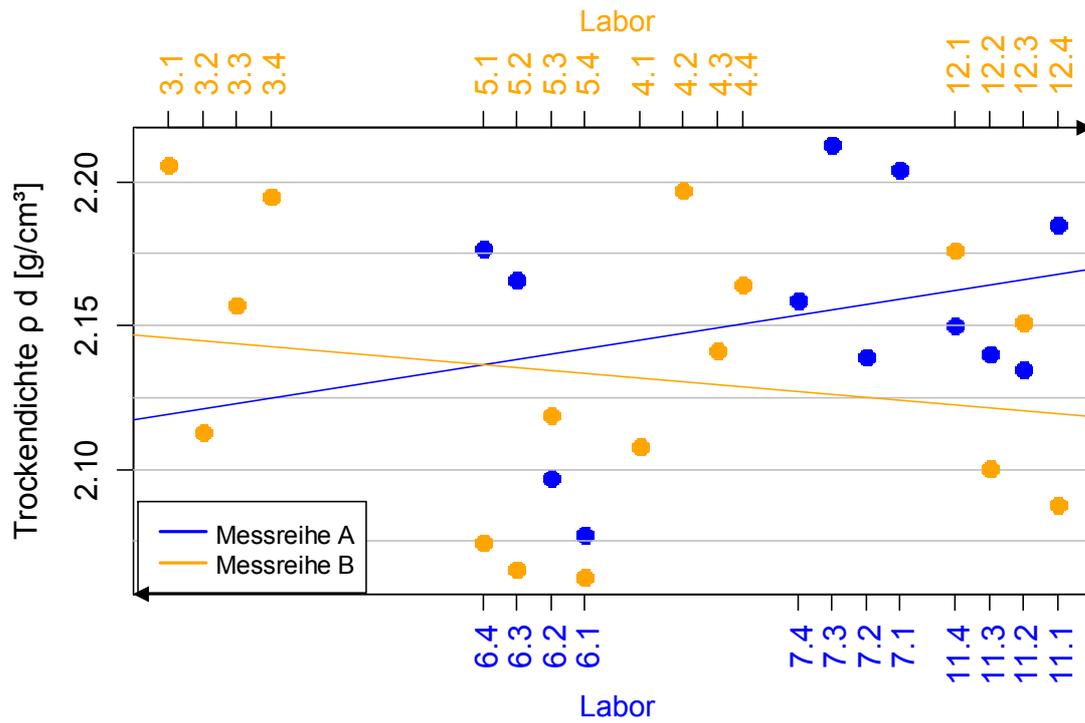


Abb. 38: geometrischer Zusammenhang Trockendichte mittels Troxler Isotopensonde, Hauptversuch

## Wassergehalt

Die statistische Auswertung für den Wassergehalt ist in Abb. 39 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,3 und 4,0 M-%. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,9 M-%.

Der Median wurde mit 2,8 M-% berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,5 M-%.

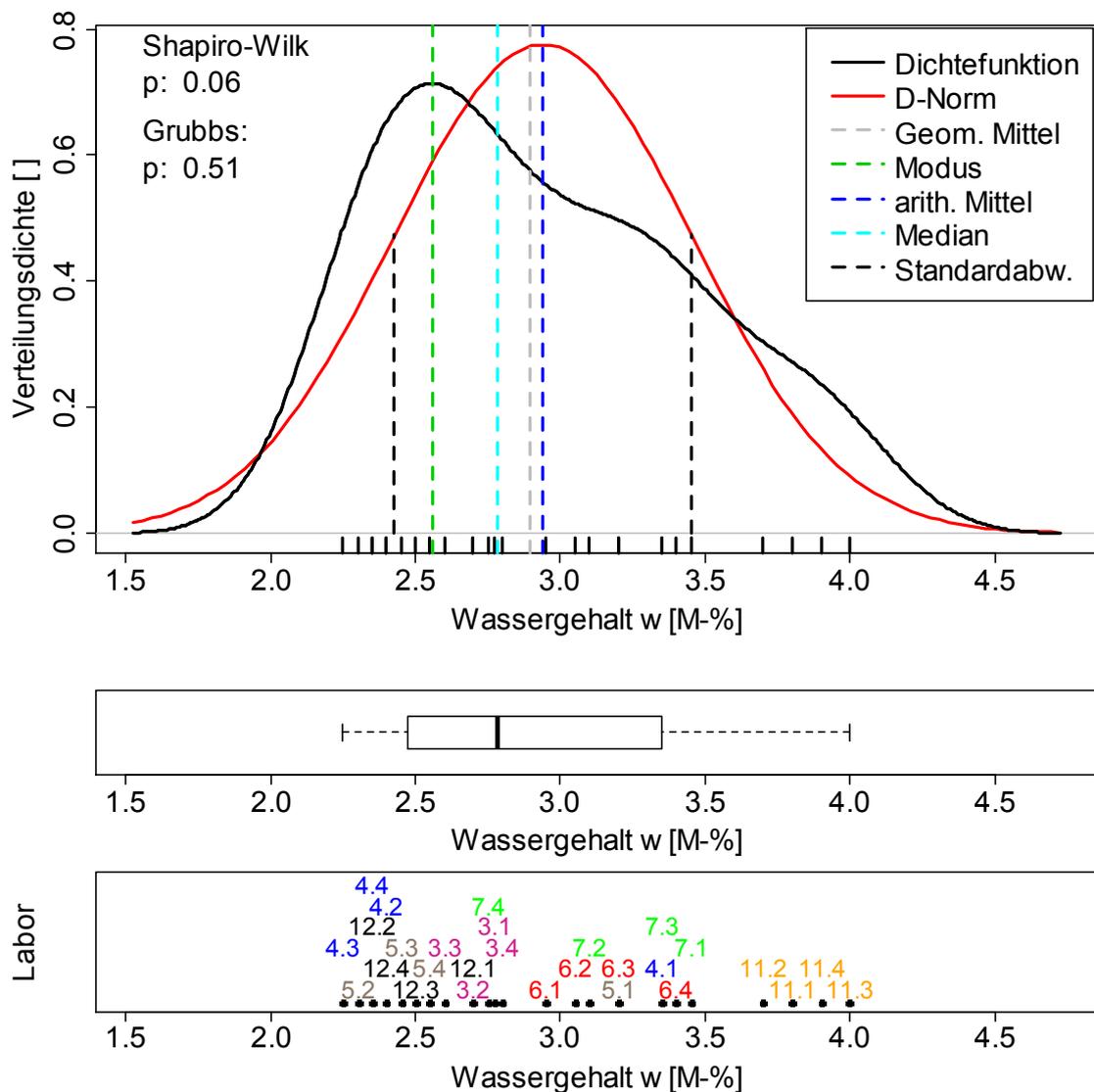


Abb. 39: Dichtefunktion Wassergehalt mittels Troxler Isotopsonde, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 40 dargestellt.

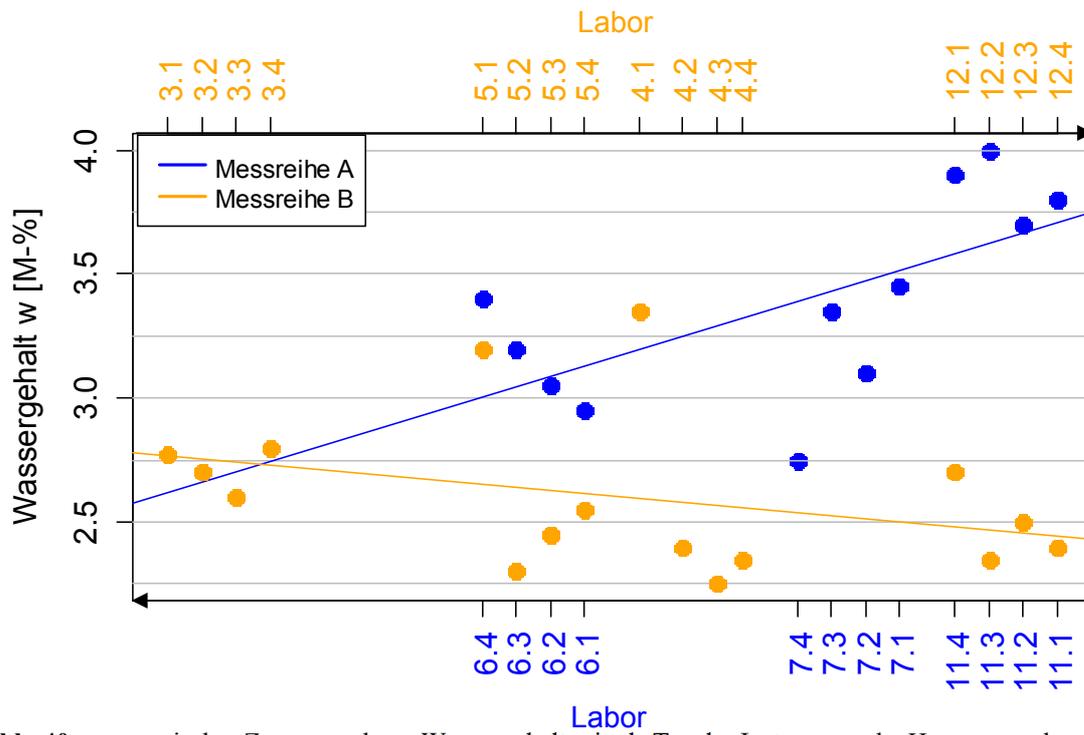


Abb. 40: geometrischer Zusammenhang Wassergehalt mittels Troxler Isotopensonde, Hauptversuch

## 5.5 In-situ-Dichtebestimmung mittels Ersatzverfahren

### 5.5.1 Vorversuch

#### Feuchtdichte

Die statistische Auswertung für die Feuchtdichte ist in Abb. 41 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,13 und 2,42 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Die Ergebnisse von Labor 1, 2 und 11 wurden als Extremwerte bestimmt.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,24 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde mit 2,23 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,08 g/cm<sup>3</sup>.

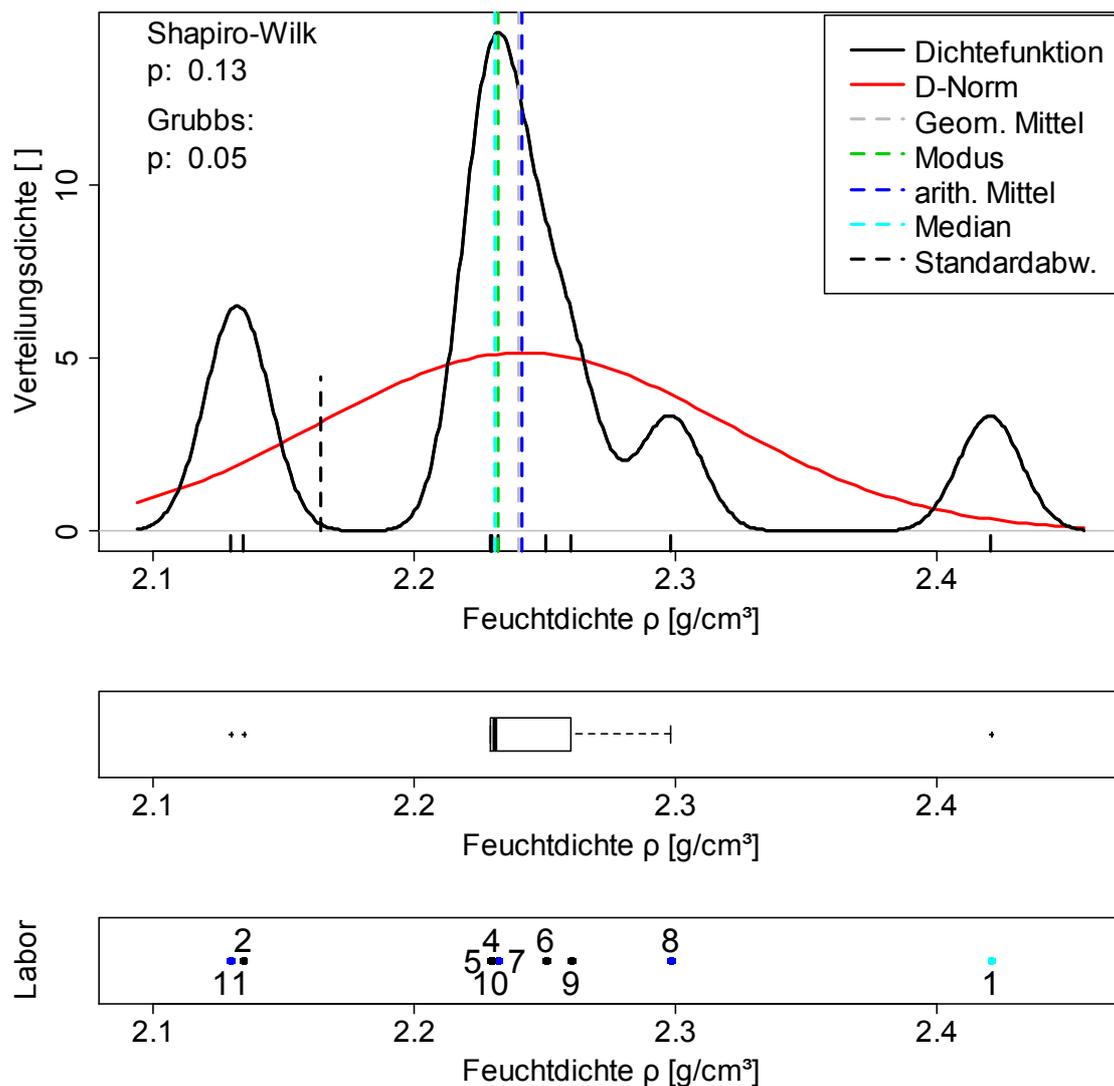


Abb. 41: Dichtefunktion Feuchtdichte mittels Ersatzverfahren, Vorversuch

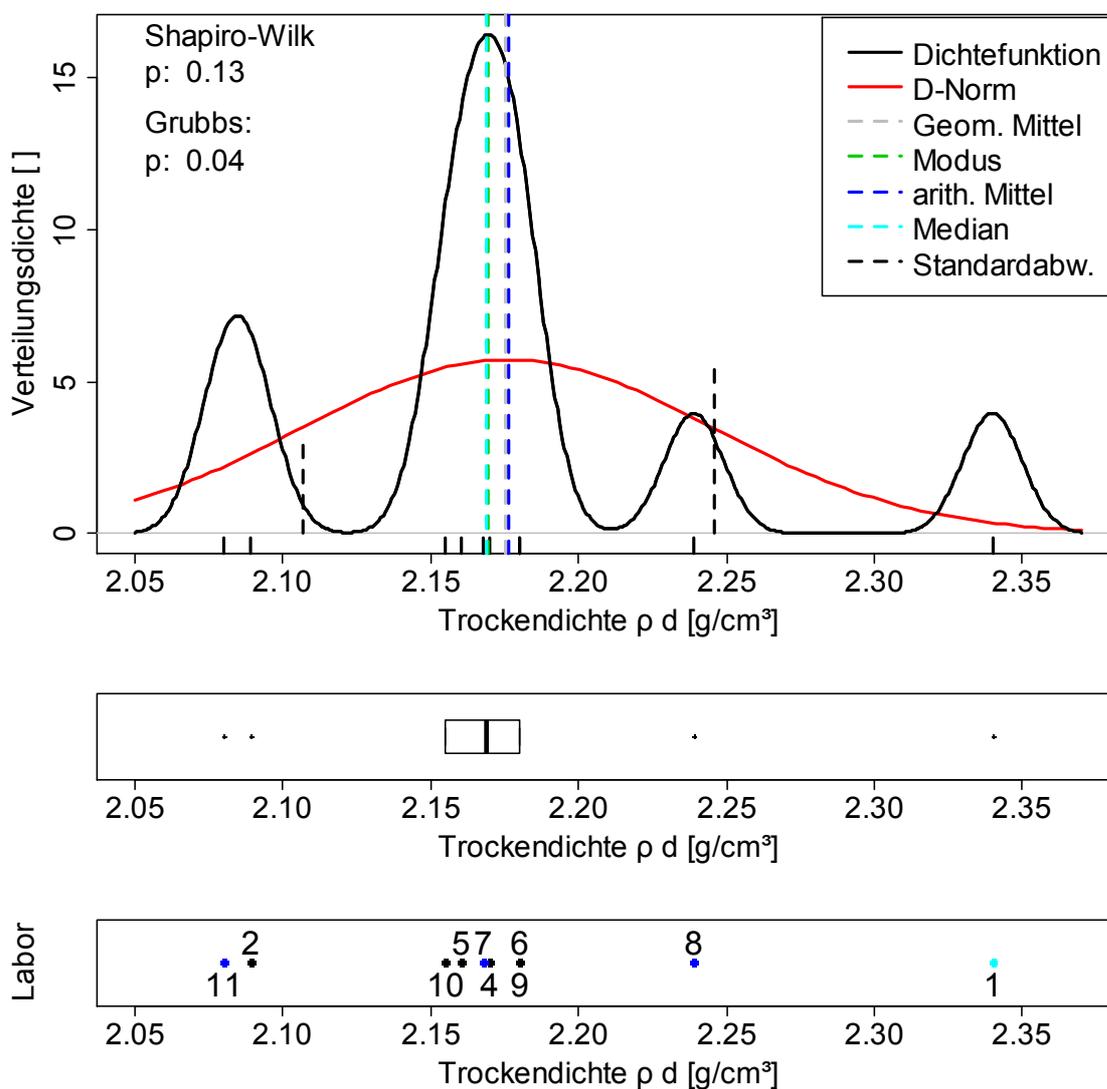
## Trockendichte

Die statistische Auswertung für die Trockendichte ist in Abb. 42 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,08 und 2,34 g/cm<sup>3</sup>. Die Ergebnisse von Labor 1, 2, 8 und 11 wurden als Ausreißer und Extremwerte identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,18 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde mit 2,17 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,07 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 42:** Dichtefunktion Trockendichte mittels Ersatzverfahren, Vorversuch

## Wassergehalt

Die statistische Auswertung für den Wassergehalt ist in Abb. 43 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,2 und 3,6 M-%. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,9 M-%.

Der Median wurde mit 3,0 M-% berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,5 M-%.

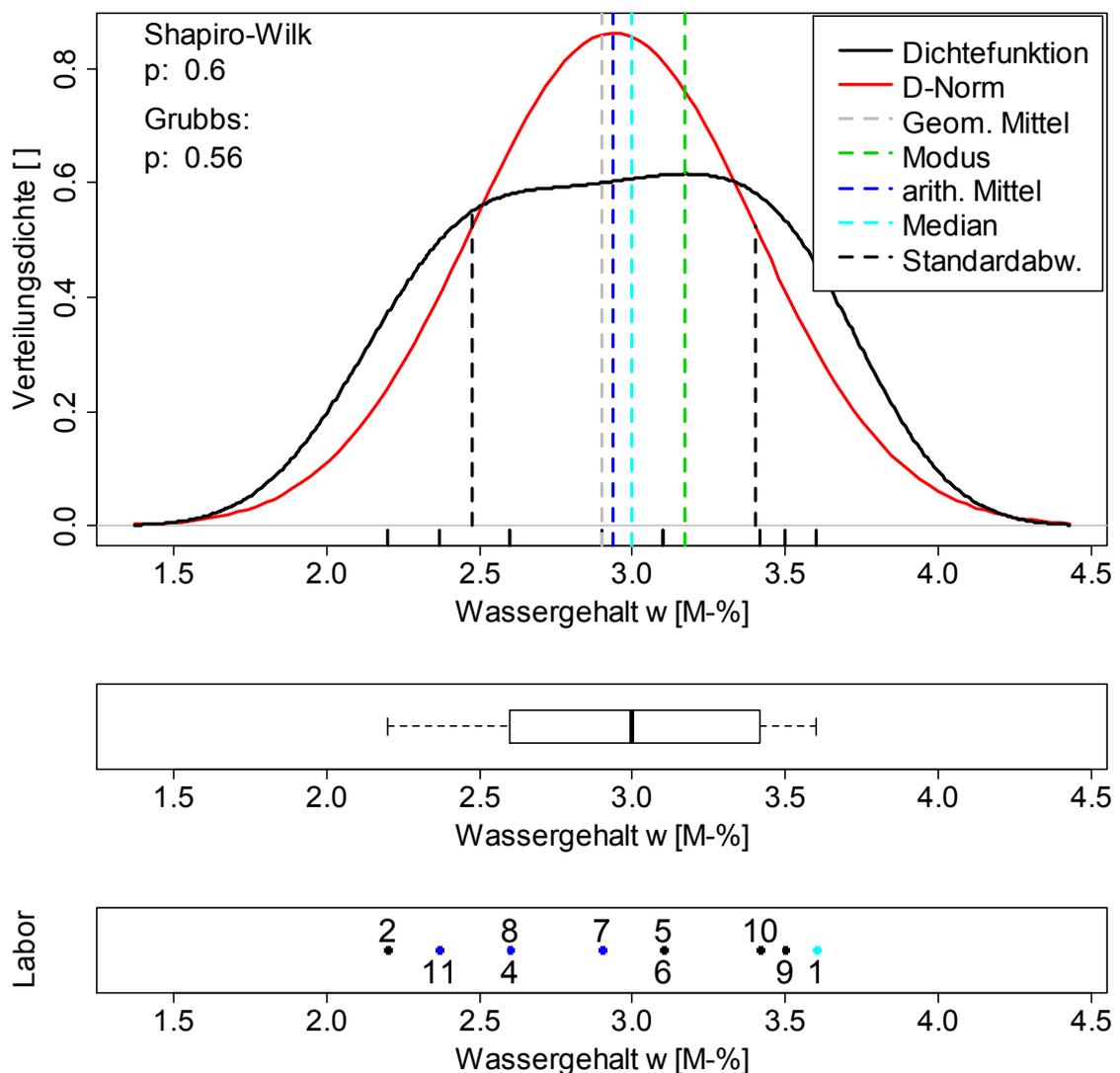


Abb. 43: Dichtefunktion Wassergehalt mittels Ersatzverfahren, Vorversuch

## 5.5.2 Hauptversuch

### Feuchtdichte

Die statistische Auswertung für die Feuchtdichte ist in Abb. 44 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,18 und 2,40 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Das Ergebnis von Labor 1 Versuch 1 wurde als Extremwert bestimmt.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,27 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde mit 2,26 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,06 g/cm<sup>3</sup>.

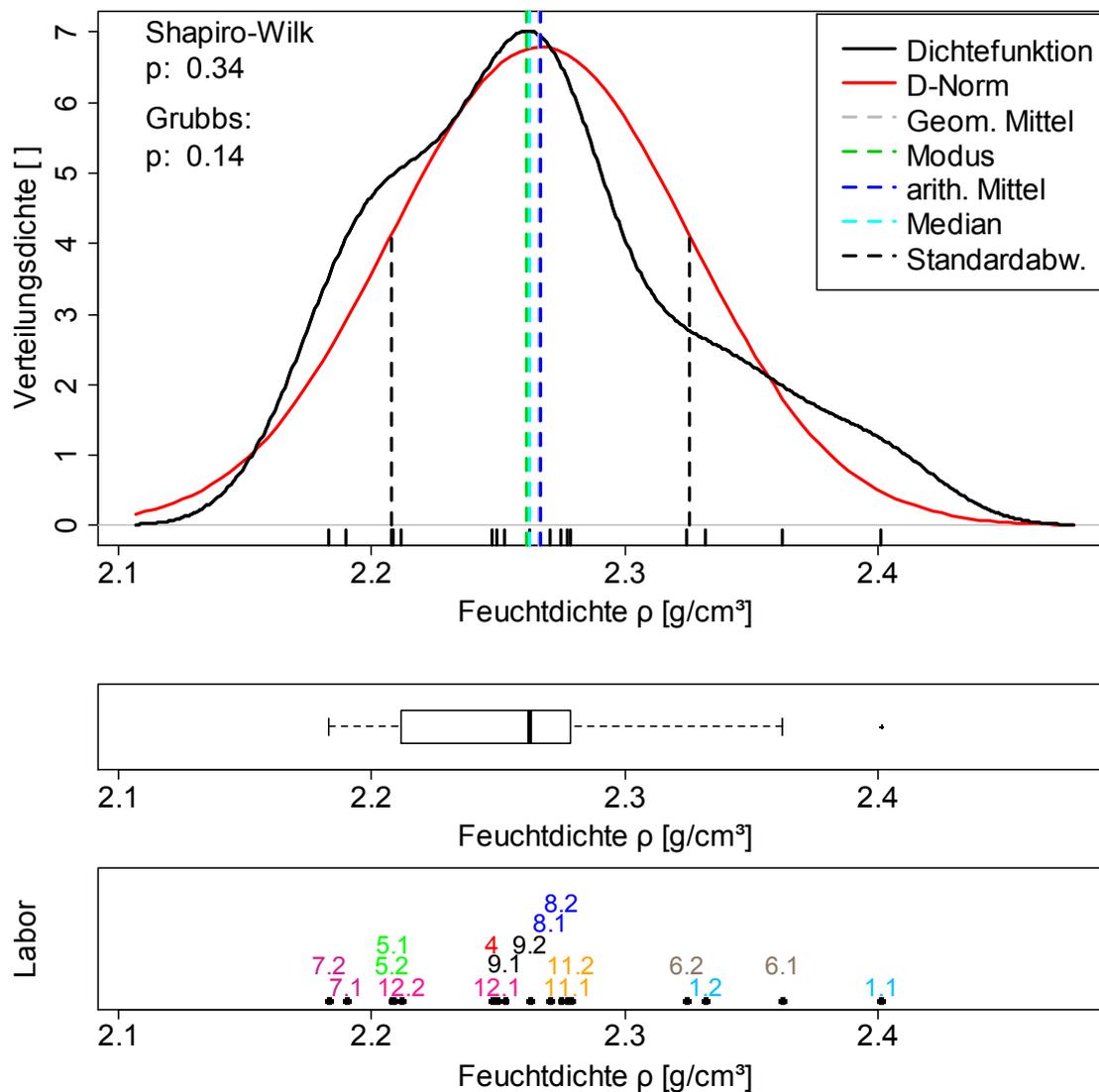


Abb. 44: Dichtefunktion Feuchtdichte mittels Ersatzverfahren, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 45 dargestellt.

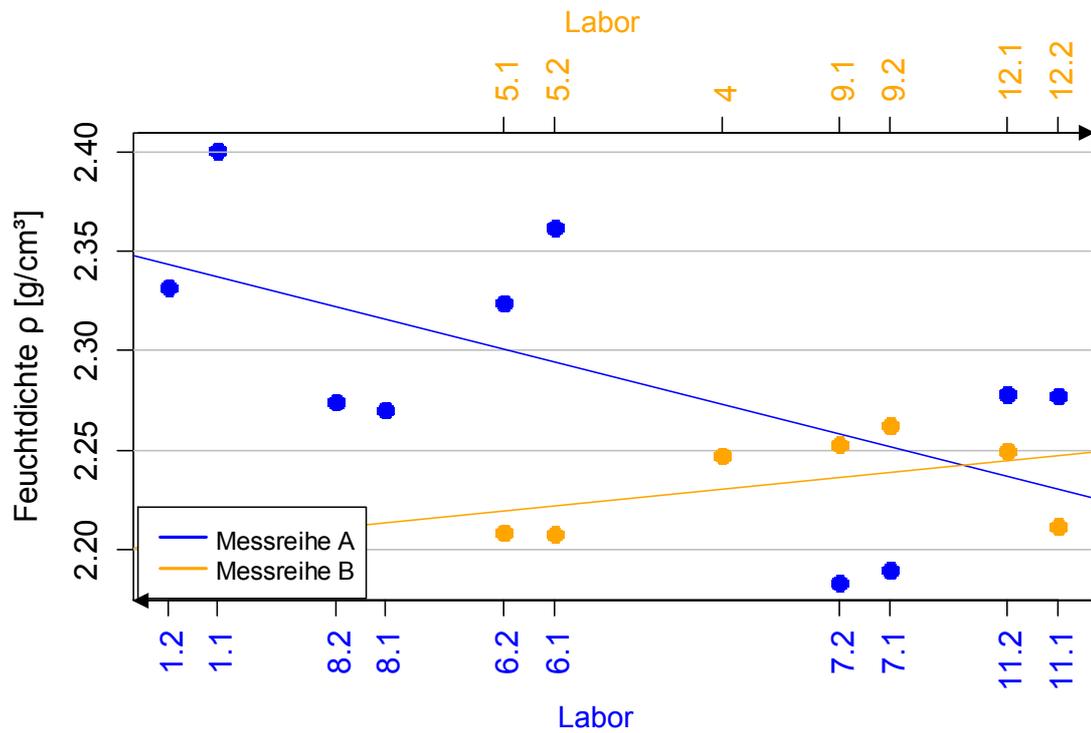


Abb. 45: geometrischer Zusammenhang Feuchtdichte mittels Ersatzverfahren, Hauptversuch

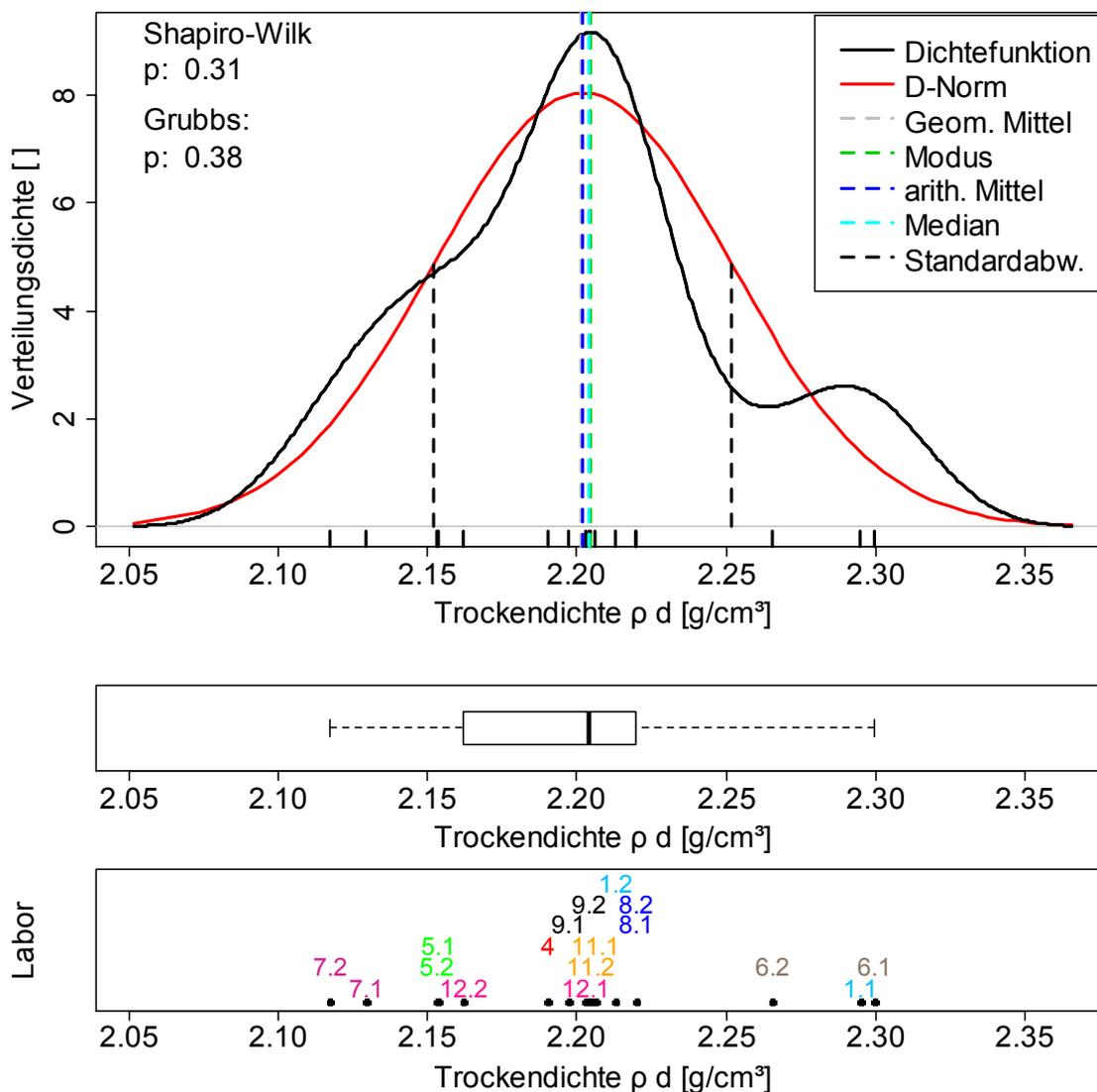
## Trockendichte

Die statistische Auswertung für die Trockendichte ist in Abb. 46 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,12 und 2,30 g/cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,20 g/cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde ebenfalls mit 2,20 g/cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,05 g/cm<sup>3</sup>.



**Abb. 46:** Dichtefunktion Trockendichte mittels Ersatzverfahren, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 47 dargestellt.

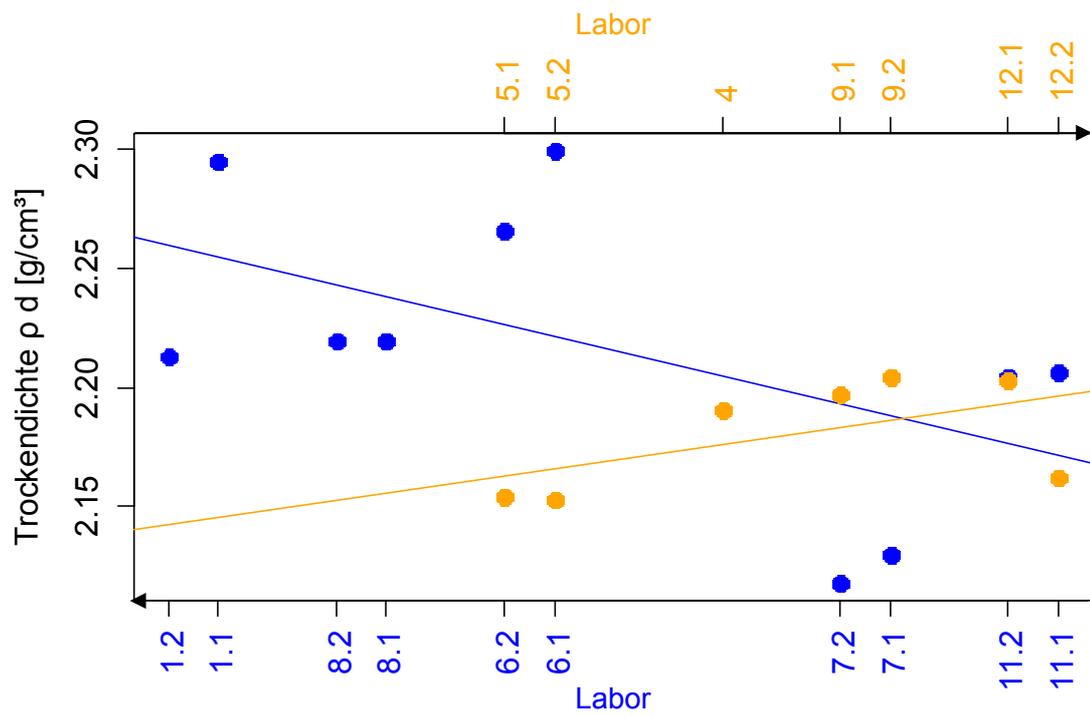


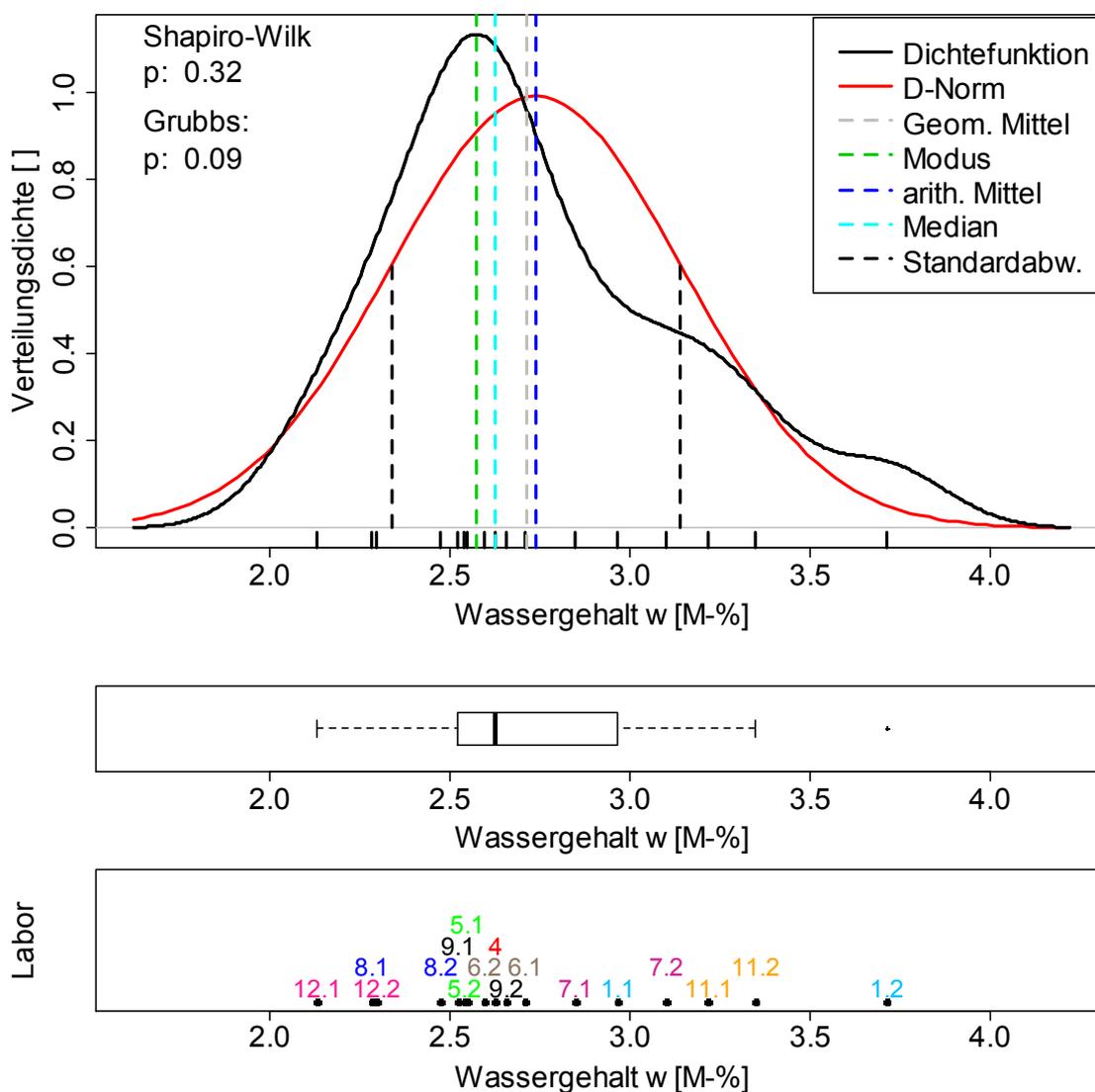
Abb. 47: geometrischer Zusammenhang Trockendichte mittels Ersatzverfahren, Hauptversuch

## Wassergehalt

Die statistische Auswertung für den Wassergehalt ist in Abb. 48 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 2,1 und 3,7 M-%. Es wurden keine Ausreißer identifiziert. Das Ergebnis von Labor 1 Versuch 2 wurde als Extremwert bestimmt. Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 2,7 M-%.

Der Median wurde mit 2,6 M-% berechnet und die Standardabweichung liegt bei 0,4 M-%.



**Abb. 48:** Dichtefunktion Wassergehalt mittels Ersatzverfahren, Hauptversuch

Die Lage der Versuche am Probefeld wird in Abb. 49 dargestellt.

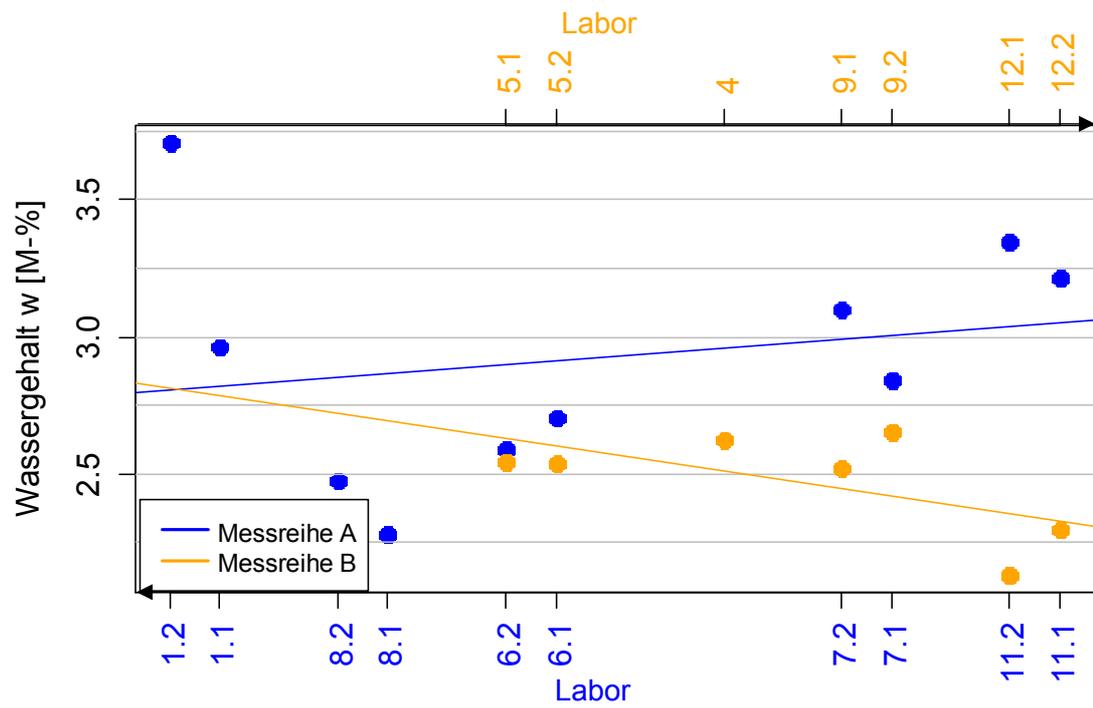


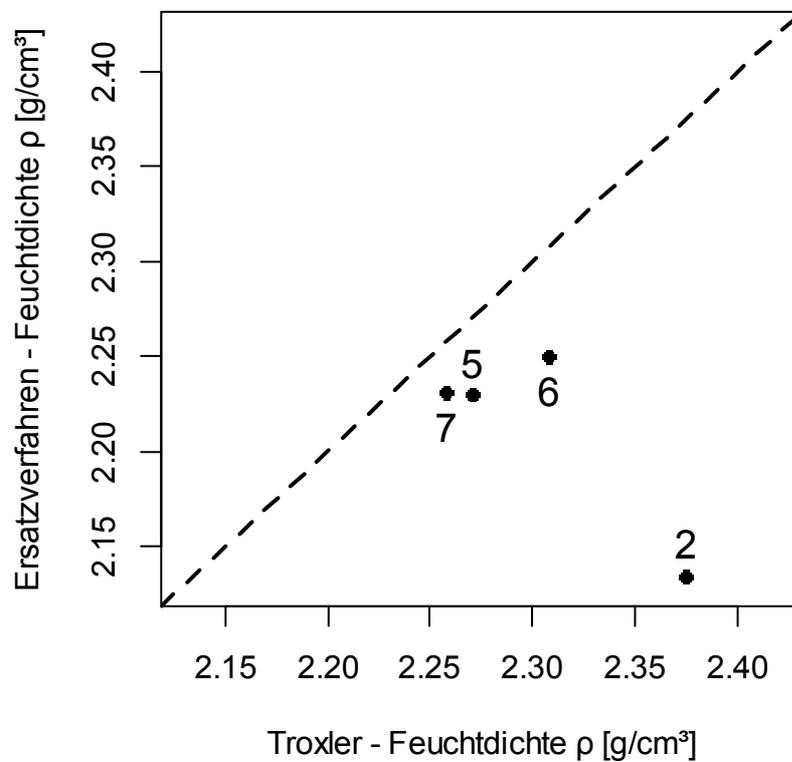
Abb. 49: geometrischer Zusammenhang Wassergehalt mittels Ersatzverfahren, Hauptversuch

## 5.6 Korrelation Dichtebestimmung

### 5.6.1 Vorversuch

#### Feuchtdichte

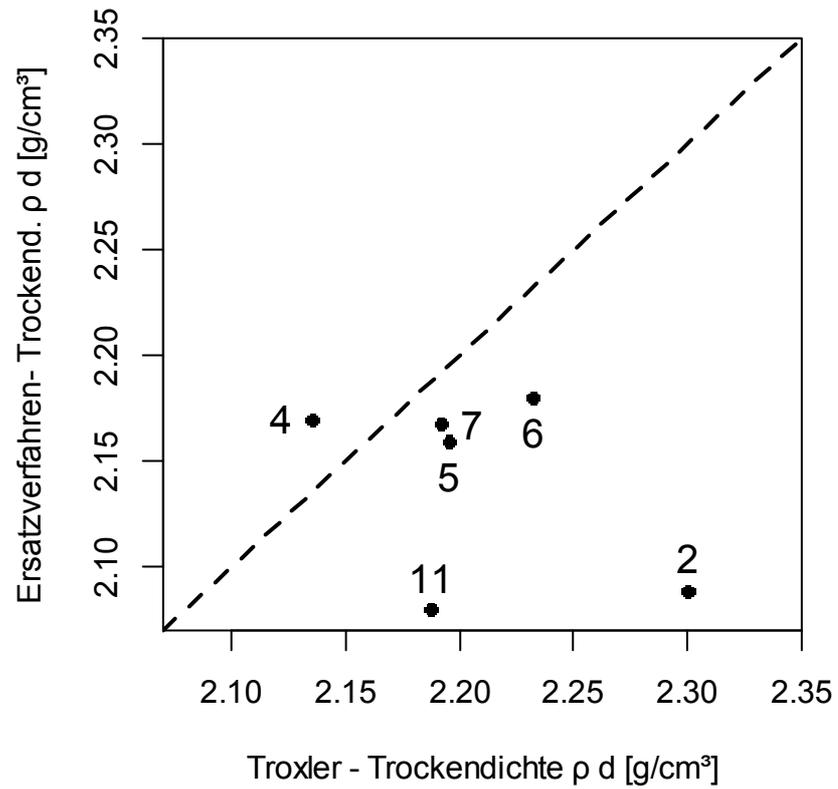
Die Korrelation der Feuchtdichte aus den Versuchen mittels Troxler Isotopsonde mit denen aus den Ersatzverfahren ist in Abb. 50 dargestellt.



**Abb. 50:** Korrelation Feuchtdichte mittels Ersatzverfahren und Troxler Isotopsonde, Vorversuch

### Trockendichte

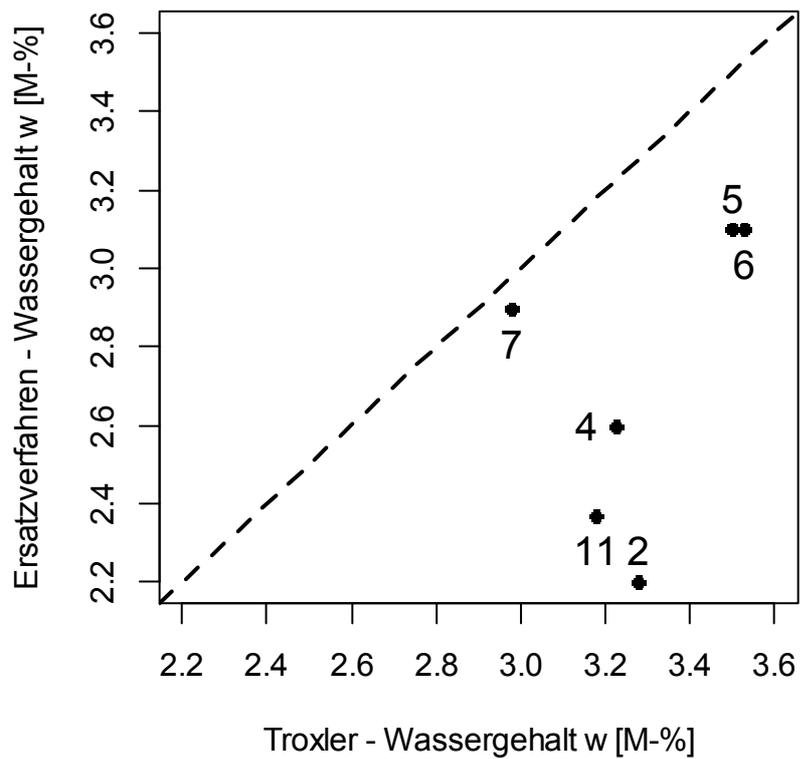
Die Korrelation der Trockendichte aus den Versuchen mittels Troxler Isotopsonde mit denen aus den Ersatzverfahren ist in Abb. 51 dargestellt.



**Abb. 51:** Korrelation Trockendichte mittels Ersatzverfahren und Troxler Isotopsonde, Vorversuch

## Wassergehalt

Die Korrelation des Wassergehaltes aus den Versuchen mittels Troxler Isotopsonde mit denen aus den Ersatzverfahren ist in Abb. 52 dargestellt.

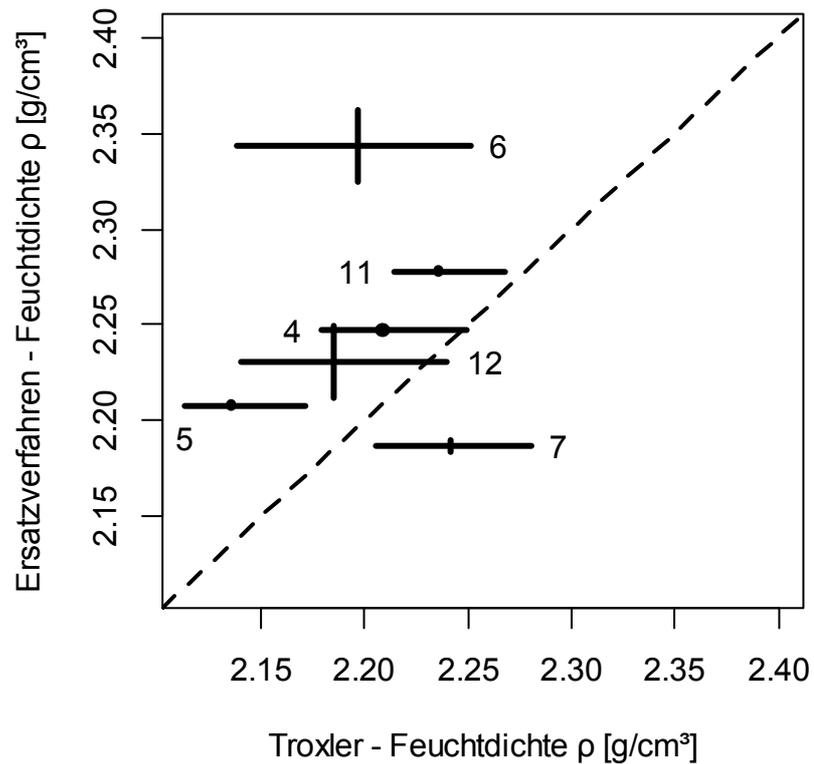


**Abb. 52:** Korrelation Wassergehalt mittels Ersatzverfahren und Troxler Isotopsonde, Vorversuch

## 5.6.2 Hauptversuch

### Feuchtdichte

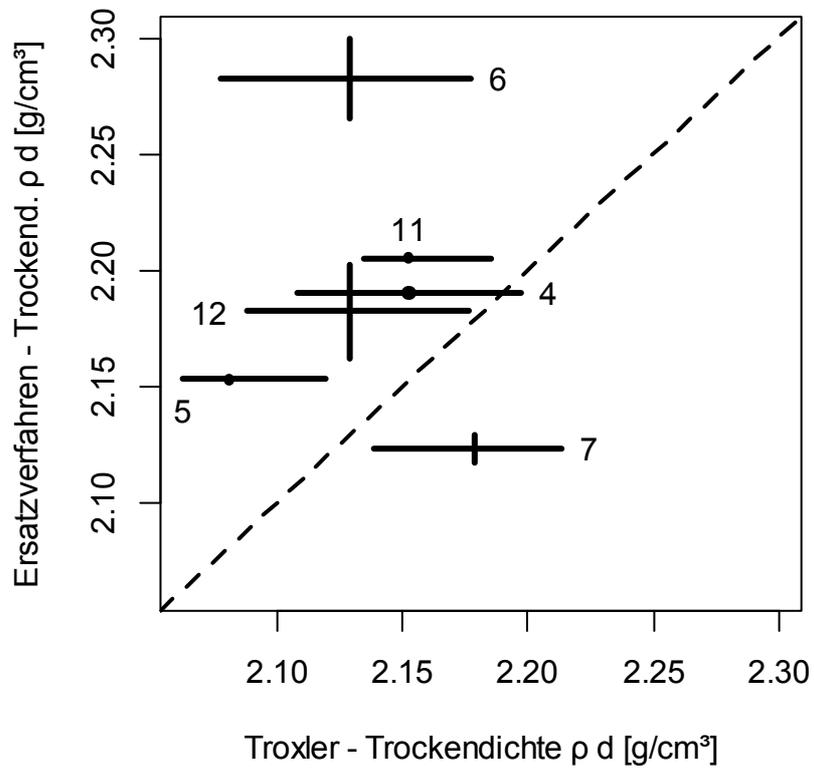
Die Korrelation der Feuchtdichte aus den Versuchen mittels Troxler Isotopsonde mit denen aus den Ersatzverfahren ist in Abb. 53 dargestellt.



**Abb. 53:** Korrelation Feuchtdichte mittels Ersatzverfahren und Troxler Isotopsonde, Hauptversuch

## Trockendichte

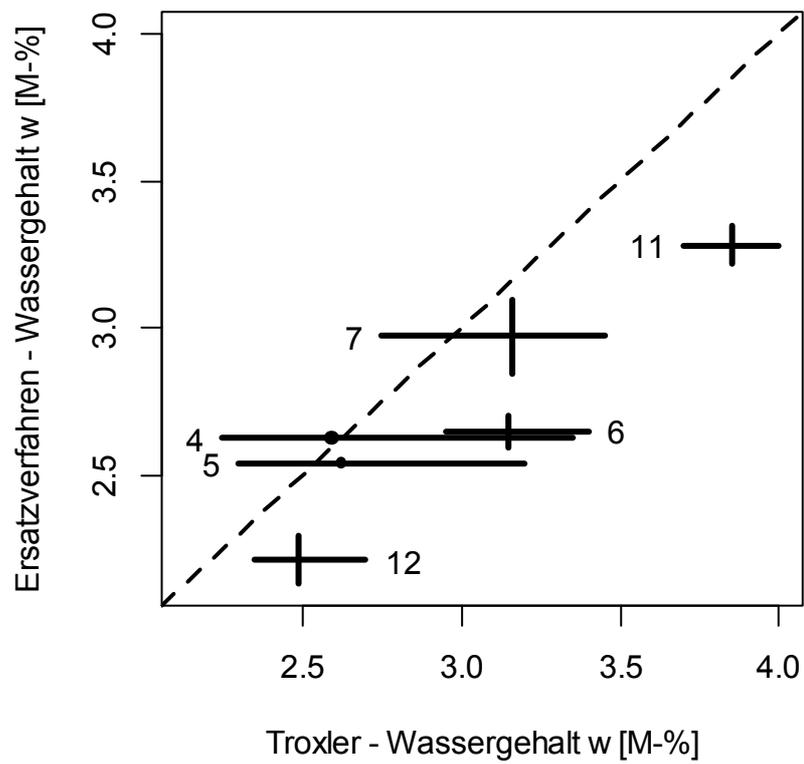
Die Korrelation der Trockendichte aus den Versuchen mittels Troxler Isotopensonde mit denen aus den Ersatzverfahren ist in Abb. 54 dargestellt.



**Abb. 54:** Korrelation Trockendichte mittels Ersatzverfahren und Troxler Isotopensonde, Hauptversuch

## Wassergehalt

Die Korrelation des Wassergehaltes aus den Versuchen mittels Troxler Isotopsonde mit denen aus den Ersatzverfahren ist in Abb. 55 dargestellt.



**Abb. 55:** Korrelation Wassergehalt mittels Ersatzverfahren und Troxler Isotopsonde, Hauptversuch

## 5.7 Korrelation Volumensbestimmung

### 5.7.1 Vorversuch

#### Smart Density Determination

Die Korrelation der Volumina aus den Versuchen mit den Ersatzverfahren und den Berechnungen aus der Smart Density Determination ist in Abb. 56 dargestellt.

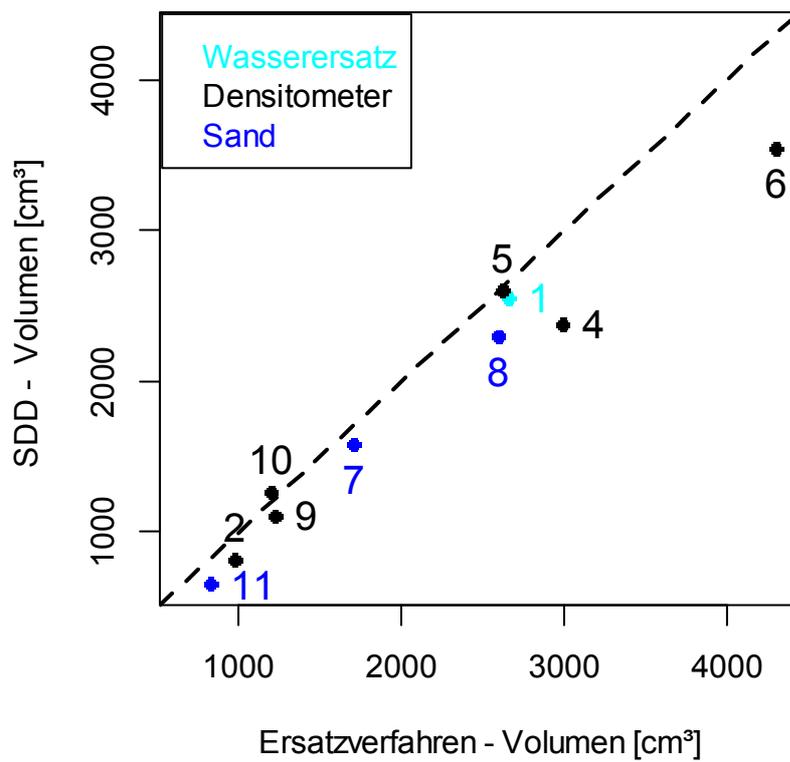


Abb. 56: Korrelation Volumensbestimmung mittels Ersatzverfahren und SDD, Hauptversuch

### Stahlkugellersatzverfahren

In der Prüfgrube 10 wurde eine Vergleichsmessung des Volumens mittels Stahlkugellersatzverfahren durchgeführt. Die berechneten Messergebnisse sind in Tab. 6 gegenübergestellt.

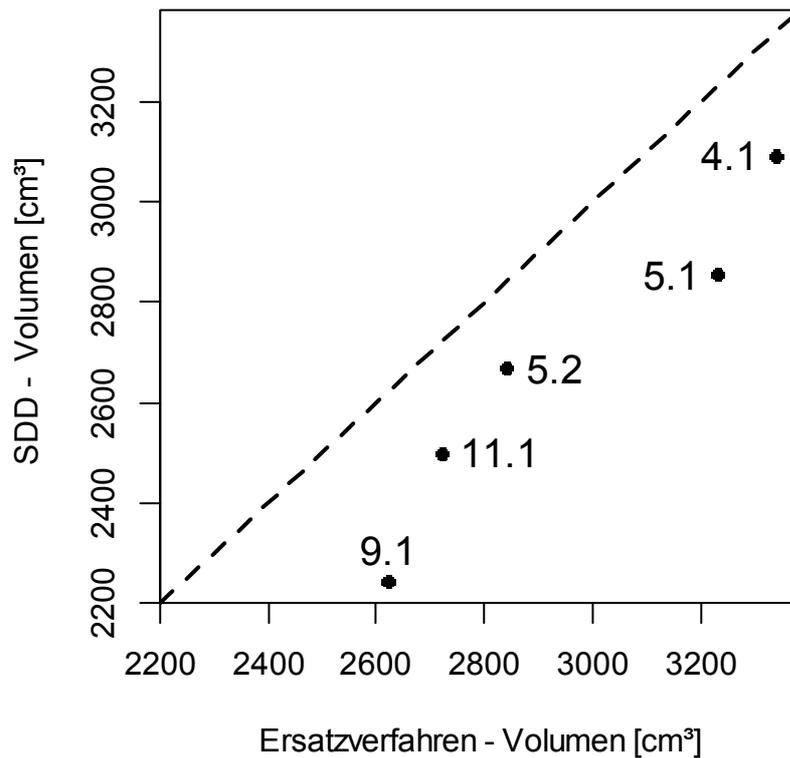
**Tab. 6:** Vergleich Stahlkugellersatzverfahren und Wasserersatzverfahren

	<b>Volumen</b> [cm <sup>3</sup> ]	<b>Feucht- dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Trocken- dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Wasser- gehalt</b> [M-%]
<b>Wasser- ersatz</b>	1222	2,26	2,18	3,5
<b>Stahlkugel- ersatz</b>	1250	2,21	2,13	3,5

## 5.7.2 Hauptversuch

### Smart Density Determination

Die Korrelation der Volumina aus den Versuchen mit den Ersatzverfahren und den Berechnungen aus der Smart Density Determination ist in Abb. 57 dargestellt.



**Abb. 57:** Korrelation Volumensbestimmung mittels Ersatzverfahren und SDD, Hauptversuch

Eine photogrammetrische Auswertung der Volumina war aufgrund von Überbelichtung der Bilder nicht für alle Prüfgruben möglich.

### Stahlkugellersatzverfahren

In der Prüfgrube 1.2 wurde eine Vergleichsmessung des Volumens mittels Stahlkugellersatzverfahren durchgeführt. Die berechneten Messergebnisse sind in Tab. 6 gegenübergestellt.

**Tab. 7:** Vergleich Stahlkugellersatzverfahren und Wasserersatzverfahren

	<b>Volumen</b> [cm <sup>3</sup> ]	<b>Feucht- dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Trocken- dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Wasser- gehalt</b> [M-%]
<b>Wasser- ersatz</b>	1498	2,30	2,21	3,7
<b>Stahlkugel- ersatz</b>	1500	2,29	2,21	3,7

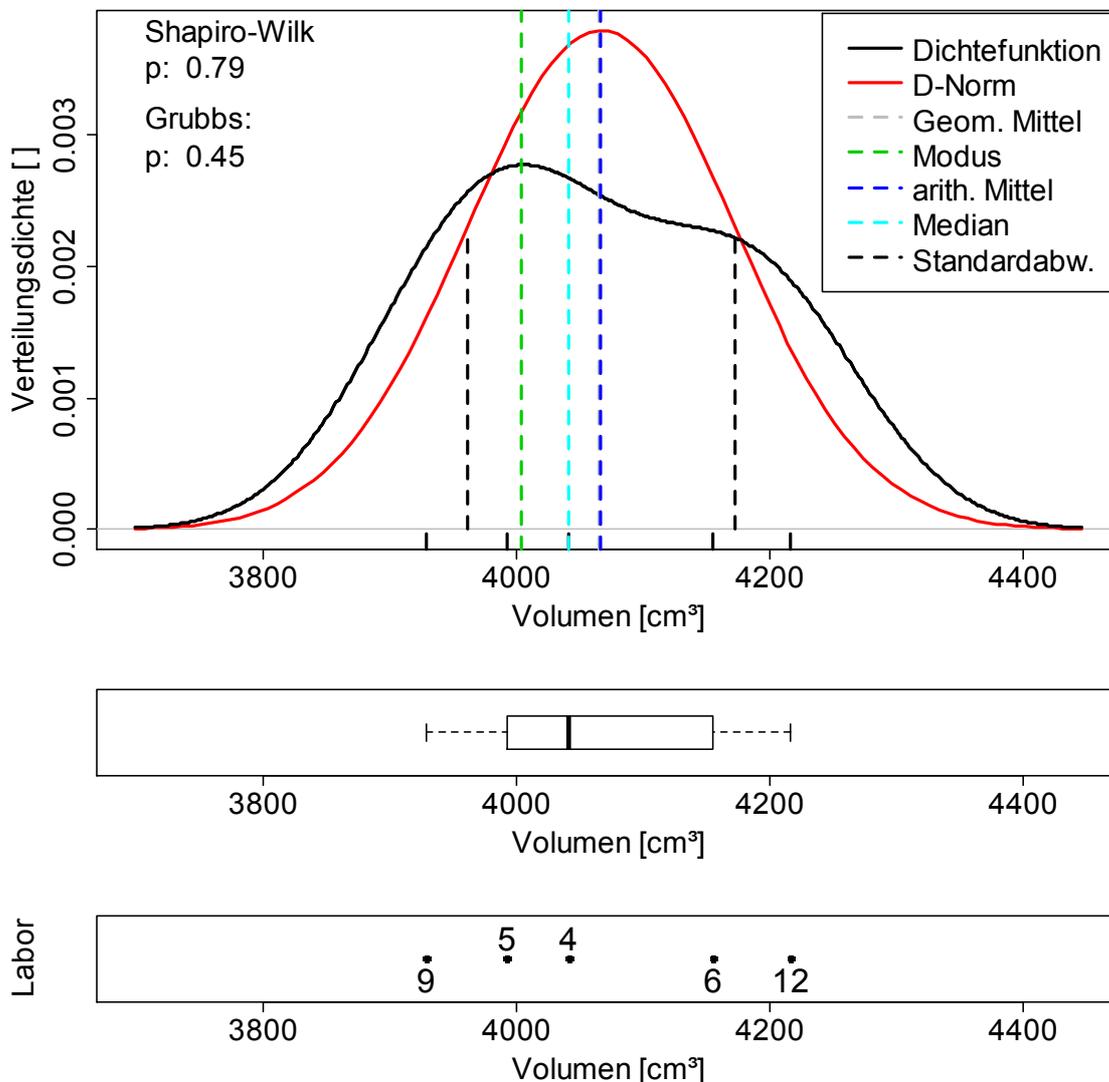
### Vergleichsmessungen Volumensbestimmung mittels Ersatzverfahren

Die statistische Auswertung für den Voluminavergleich an einer Prüfgrube ist in Abb. 58 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen zwischen 3929 und 4216 cm<sup>3</sup>. Es wurden keine Ausreißer identifiziert.

Der arithmetische Mittelwert liegt bei etwa 4067 cm<sup>3</sup>.

Der Median wurde mit 4041 cm<sup>3</sup> berechnet und die Standardabweichung liegt bei 118 cm<sup>3</sup>.



**Abb. 58:** Dichtefunktion Volumensbestimmung an einer Prüfgrube mittels Ersatzverfahren

Die Vergleichsmessungen mittels SDD waren aufgrund von Überbelichtung der Bilder nicht auswertbar.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den Versuchen zusammengefasst und diskutiert. Aufgrund der großen Streuungen und der Empfindlichkeit des arithmetischen Mittels auf Extremwerte wurde der Median als Vergleichsgröße für alle folgenden Beschreibungen gewählt.

### 6.1 Tragfähigkeitsuntersuchung

#### Statischer Lastplattenversuch

Die Auswertungen der Messdaten sowohl des Vorversuches als auch des Hauptversuches zeigen eine große Streuung der Messergebnisse, vor allem des  $E_{v2}$ , von bis zu  $90 \text{ MN/m}^2$  (nach Ausschluss der Extremwerte) und einer Standardabweichung von bis zu  $28 \text{ MN/m}^2$ . Die Streuung des Verdichtungsmaßes mit einer Differenz von 1,6 zwischen Minima und Maxima und einer Standardabweichung von bis zu 0,4 weisen auf eine ungleichmäßige Verdichtung der Probefelder hin.

Ein Vergleich der Ergebnisse des Vorversuches und des Hauptversuches zeigt höhere Verformungsmoduli im Hauptversuch und ein geringeres Verdichtungsmaß als im Vorversuch.

Die Trendlinien über das Probefeld verlaufen in etwa waagrecht (nach Ausschluss der Extremwerte) und zeigen daher keine signifikanten Trends der ungleichmäßigen Verdichtung. Außerdem ist eine starke Streuung nebeneinanderliegender Messpunkte (ein Meter Abstand) ebenso wie bei Messungen desselben Labors zu erkennen.

#### Dynamischer Lastplattenversuch

Eine statistische Auswertung und Interpretation der Messergebnisse aus dem Vorversuch ist aufgrund der geringen Datenanzahl nicht aussagekräftig.

Die Verteilungskurve des Hauptversuches kann als Rechtecksverteilung interpretiert werden. Die Betrachtung der Messstreuung der Grundgesamtheit verglichen mit denen der einzelnen Labors zeigt eine Schwankung der Messwerte innerhalb der Messreihe eines Labors von durchschnittlich  $11 \text{ MN/m}^2$  und einer Standardabweichung von durchschnittlich  $4,4 \text{ MN/m}^2$ , während die Standardabweichung aller Messergebnisse  $8,9 \text{ MN/m}^2$  ergibt und die Spannweite

der Ergebnisse eine Differenz von  $34 \text{ MN/m}^2$  aufweist. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass das Probefeld unregelmäßig verdichtet wurde.

Ein Vergleich der Ergebnisse des Vorversuches und des Hauptversuches zeigt im Mittel einen höheren Verformungsmodul im Hauptversuch.

Die Trendlinien über das Probefeld verlaufen steigend von links nach rechts und zeigen daher einen Trend in der Verdichtung an. Außerdem ist in dieser Darstellung zu erkennen, dass nebeneinanderliegende Prüfbereiche oft ähnliche Messergebnisse liefern.

### **Korrelation**

Aufgrund der unterschiedlichen Belastungsarten des dynamischen bzw. statischen Lastplattenversuches können die beiden Verformungsmodule nicht direkt korreliert werden. Der Dynamische Verformungsmodul kann aufgrund der Massenträgheit überschätzt werden. Der Statische Verformungsmodul wiederum kann durch einen sogenannten Kurzschluss durch die Entlastung an den Aufstellungspunkten des Gegengewichtes überschätzt werden. (vgl. Adam, 2013)

Diese Aussage spiegelt sich auch in der zuvor beschriebenen Zusammenfassung der Messergebnisse aus den statischen und dynamischen Lastplattenversuchen wieder.

Die in der RVS 08.03.04 angeführte Umrechnung der vorgeschriebenen Mindestanforderungen von dem Statischen Verformungsmodul  $E_{v1}$  auf den Dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$ , in diesem Fall für nicht bindigen Boden und einem  $E_{v1} \geq 25 \text{ MN/m}^2$  Gleichung (5)  $E_{vd} = 10 + 4 / 5 \cdot E_{v1}$  wurde für die Korrelation der Verformungsmoduli herangezogen

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass diese Gleichung nicht zur Umrechnung von Messergebnissen verwendet werden darf (vgl. Adam, 2013). Sie wird in dieser Arbeit zur Gegenüberstellung der Messergebnisse herangezogen.

Die Korrelation zeigt, dass sowohl im Vorversuch als auch im Hauptversuch der Statische Verformungsmodul  $E_{v1}$  tendenziell größer als der Dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  ausfällt. Dies ist widersprüchlich zu den, unter anderem in der RVS 08.03.01 angeführten Mindestanforderung, in denen der in der Prüfung zu erreichende  $E_{vd}$  höher als der zugehörige  $E_{v1}$  gefordert ist.

Die Messergebnisse der Tragfähigkeitsbestimmung weisen auf einen anisotropen Aufbau des Probefeldes hin.

## 6.2 In-situ-Dichtebestimmung

### Troxler Isotopsonde

Die Auswertungen der Messdaten der Dichtebestimmung zeigen eine Standardabweichung von  $0,06 \text{ g/cm}^3$  im Vorversuch bzw.  $0,05 \text{ g/cm}^3$  im Hauptversuch und des Wassergehaltes von  $0,3 \text{ M-}\%$  bzw.  $0,6 \text{ M-}\%$ .

Ein Vergleich der Ergebnisse des Vorversuches und des Hauptversuches zeigen eine geringere Feuchtdichte sowie Trockendichte im Hauptversuch als im Vorversuch, auch der Wassergehalt ist im Hauptversuch niedriger als im Vorversuch.

Die Betrachtung der Standardabweichung innerhalb der Messreihe der einzelnen Labors errechnet sich mit durchschnittlich  $0,02 \text{ g/cm}^3$  im Vorversuch bzw.  $0,03 \text{ g/cm}^3$  im Hauptversuch. Die Messdaten des Wassergehaltes der einzelnen Labors weisen eine durchschnittliche Standardabweichung von  $0,16 \text{ M-}\%$  im Vorversuch bzw.  $0,22 \text{ g/cm}^3$  im Hauptversuch auf. Die Unterschiede ergeben sich aus den lokalen und natürlichen Unterschieden im Probefeld wurde.

Die Trendlinien über das Probefeld zeigen vor allem in der Auswertung des Wassergehaltes der Messreihe A einen fallenden Trend über den Tagesverlauf. Eine Begründung dafür kann die höhere Oberflächenfeuchtigkeit in den Morgenstunden aufgrund der höheren Luftfeuchtigkeit in den Nachtstunden und die Austrocknung des Schüttgutes durch die Sonneneinstrahlung über den Tag sein.

### Ersatzverfahren

Die Aussagekraft der statistischen Auswertung des Vorversuches ist aufgrund der geringen Anzahl der Messergebnisse und der großen Streuung zu hinterfragen. Jedoch zeigt die Auswertung ähnliche Ergebnisse, wie die des Hauptversuches und wird daher für die Schlussfolgerungen mit herangezogen.

Die Messergebnisse der Dichtebestimmung zeigen sowohl im Vorversuch als auch im Hauptversuch eine Bandbreite von rund  $2,1 \text{ g/cm}^3$  bis  $2,4 \text{ g/cm}^3$  mit einer Standardabweichung von maximal  $0,08 \text{ g/cm}^3$  auf. Der Wassergehalt bewegt sich zwischen  $2,1 \text{ M-}\%$  und  $3,6 \text{ M-}\%$  in beiden Versuchsabfolgen, die Standardabweichung liegt im Vorversuch bei  $0,5 \text{ M-}\%$  und im Hauptversuch bei  $0,4 \text{ M-}\%$ .

Ein Vergleich der Ergebnisse des Vorversuches und des Hauptversuches zeigen eine höhere Feuchtdichte sowie Trockendichte im Hauptversuch als im Vorversuch. Der Wassergehalt ist im Hauptversuch niedriger als im Vorversuch.

Die Trendlinien über das Probefeld zeigen, wie auch bei der Auswertung der Messdaten mittels Troxler Isotopsonde, in der Auswertung des Wassergehaltes einen fallenden Trend über den Tagesverlauf.

### **Korrelation**

Die Korrelationen der Ergebnisse aus den beiden Messarten zeigen im Vorversuch höhere ermittelte Trockendichten mit der Troxler Isotopsonde als mit den Ersatzverfahren. Dies kann darauf zurückzuführen werden, dass bei der Einstichtiefe von 20 cm die Strahlenquelle im Bruchschotter zum Liegen kam, während bei dem Aushub der Prüfgruben für das Ersatzverfahren darauf geachtet wurde, nur die obere Schicht mit Rundkies auszuheben.

Der Vergleich der Messergebnisse im Hauptversuch zeigt tendenziell höhere mittels Ersatzverfahren gemessene Trockendichten als mittels Troxler Isotopsonde.

Die Korrelation der Messergebnisse des Wassergehaltes ergeben, sowohl im Vorversuch als auch im Hauptversuch tendenziell höher Messergebnisse durch die Messung mittels Troxler Isotopsonde als mit den Ersatzverfahren.

Die Messergebnisse der Dichtebestimmung des Hauptversuches weisen auf einen homogenen Aufbau des Probefeldes hin.

## 6.3 Volumensbestimmung

### **Korrelation Smart Density Determination mit Ersatzverfahren**

Sowohl in der Korrelation der Messergebnisse des Vorversuches als auch des Hauptversuches ergibt die Ermittlung des Volumens der Prüfgrube mit der SDD tendenziell geringere Werte als mit den Ersatzverfahren. Außerdem kann vor allem im Vorversuch auf eine proportional zur Prüfgrubentiefe steigende Abweichung geschlossen werden. Ein systematischer Fehler von etwa  $100 \text{ cm}^3$  kann ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

Aufgrund der Überbelichtung der Bilder im Hauptversuch ist die Datenanzahl zu gering, um eine Aussage über die Anwendbarkeit zu treffen. Um eine detailliertere Fehleranalyse zu ermöglichen, müssen weitere Vergleichsmessungen getätigt werden.

### **Korrelation Stahlkugelerersatzverfahren mit Ersatzverfahren**

Die Vergleichsmessungen mittels Stahlkugelerersatzverfahren zeigen im Vorversuch ein um  $28 \text{ cm}^3$  und im Hauptversuch um  $2 \text{ cm}^3$  höheres Volumen als durch die Bestimmung mittel Densitometer. Die daraus berechneten Dichten ergeben eine Differenz von bis zu  $0,05 \text{ g/cm}^3$  bzw.  $0,01 \text{ g/cm}^3$ . Diese Abweichungen bewegen sich in der Standardabweichung welche im Zuge der statistischen Auswertung der Ersatzverfahren berechnet wurden und korrelieren daher gut mit diesen.

## 7 Ausblick

Die Untersuchungen zeigen die Wichtigkeit einer großen Anzahl an Vergleichsmessungen, um eine aussagekräftige Auswertung der Messergebnisse zu gewährleisten. Die Präzision und Genauigkeit der Versuche ist sehr stark von den Bedingungen in situ abhängig. Vor allem bei der Erstellung von Mindestanforderungen an den Boden oder die Schüttung müssen diese Streuungen der Messergebnisse berücksichtigt werden.

Die Verwendbarkeit der SDD für die In-situ-Dichtebestimmung muss noch weiter verifiziert werden. Hierfür wird angedacht Vergleichsmessungen an einer Prüfgrube im Labor durchzuführen. Um einen Fehler in der photogrammetrischen Berechnung und Auswertung auszuschließen, werden Vergleichsmessungen mit einem Laserscanner angedacht. Zusätzlich wird das Volumen mit dem Wasser- und Sandersatzverfahren bestimmt. Der Wasserersatz wird, sowohl mit dem Densitometer als auch nur mit Wasser durchgeführt.

Die aus diesem österreichweiten Rundversuch gewonnenen Erkenntnisse zeigen die Wichtigkeit von Vergleichsversuchen auf. Außerdem kann durch den Rundversuch der Austausch zwischen den Labors und die Verbesserung und Aufrechterhaltung des hohen Standards der geotechnischen Prüflabors in Österreich verstärkt werden.

## 8 Literaturverzeichnis

AccuWeather.com (Zugriff: 1.Oktober, 2018)

<https://www.accuweather.com/de/at/gunskirchen/23673/month/23673?monyr=7/01/2018> und

<https://www.accuweather.com/de/at/gunskirchen/23673/month/23673?monyr=4/01/2018>

Ackermann, F. (1976)

Photogrammetrie: Grundlagen, Verfahren, Anwendung. 7. Auflage, S. 22ff und S. 139, B. G. Teubner, Stuttgart

Adam, D. (2013)

Skript zur 9. Erdbaufachtagung „Aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik“, „Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen“, Bauakademie Sachsen, Leipzig

Ahmetovic, E. (2015)

Bachelorprojekt, Das Stahlkugelerersatzverfahren zur Bestimmung der Dichte von Böden insitu, Technische Universität Graz

Österreichisches Normungsinstitut (1979)

ÖNORM B 4414-2, Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldverfahren, Wien

Österreichisches Normungsinstitut (2018)

ÖNORM B 4417, Geotechnik – Untersuchung von Böden, Statischer Lastplattenversuch, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Österreichisches Normungsinstitut (2015)

ÖNORM EN ISO 17892-1, Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben, Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

FSV (2010)

RVS 08.03.01: Technische Vertragsbedingungen, Vor-, Abbruch-, und Erdarbeiten, Erdarbeiten, Wien

FSV (2010)

RVS 08.03.04: Technische Vertragsbedingungen, Vor-, Abbruch-, und Erdarbeiten, Verdichtungsnachweis mittels Dynamischen Lastplattenversuches, Wien

FGSV (1999)

Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, TP BF – StB, Teil B 4.3, Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von Böden, Essen

R Documentation (Zugriff: 10.Oktober, 20188)

<https://www.rdocumentation.org>

R Manual (Zugriff: 10.Oktober, 2018)

<https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/>

Silverman, B.W. (1986)

Density Estimation for Statistics and Data Analysis, School of Mathematics University of Bath, UK, published in Monographs on Statistics and Applied Probability, London; Chapman and Hall, 1986

## 9 Anhangsverzeichnis

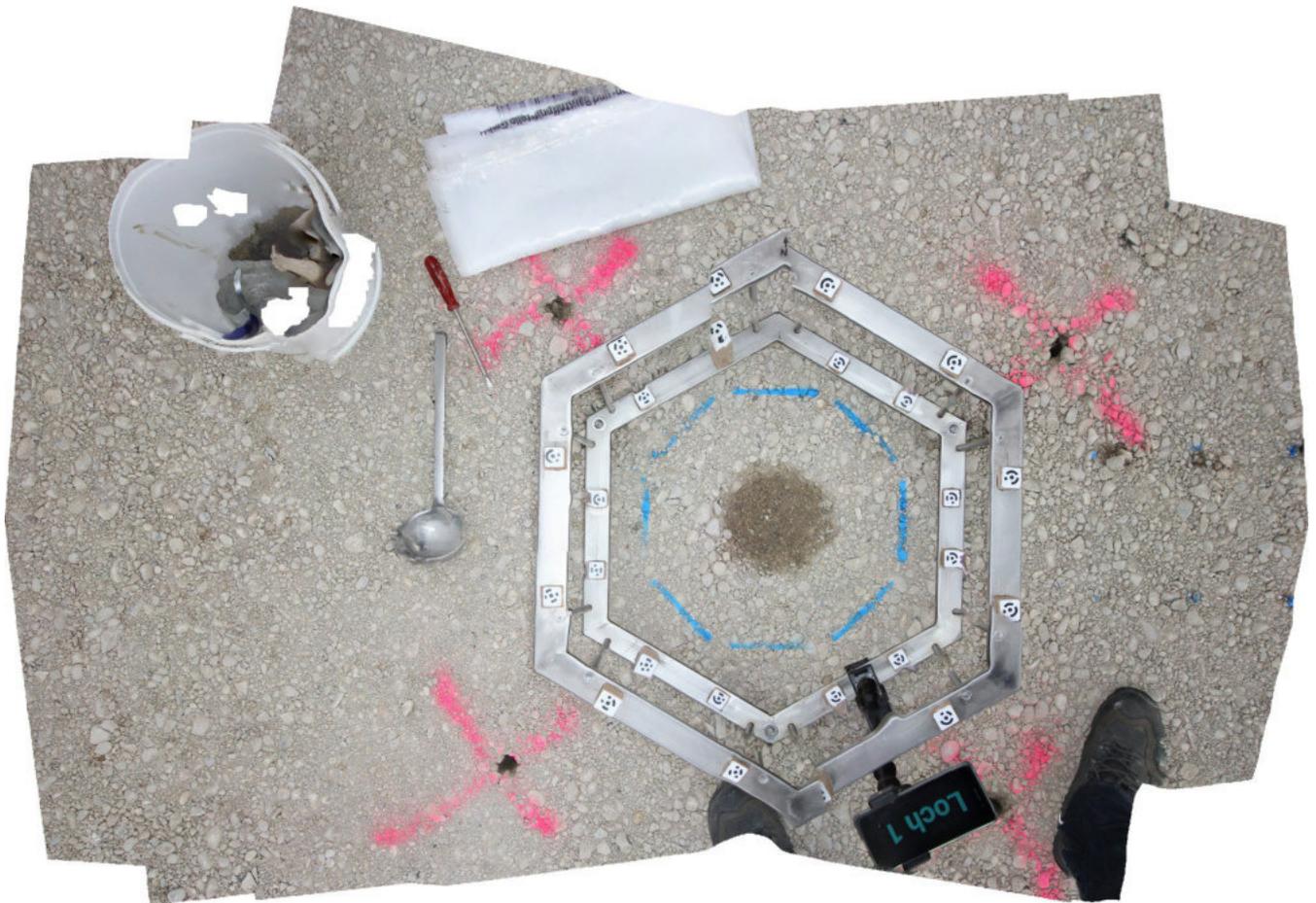
- A. Berechnungsbericht Smart Density Determination
- B. Statische Verformungsmodule (Vorversuch)
- C. Dynamische Verformungsmodule (Vorversuch)
- D. Troxler Isotopsonde – Messergebnisse (Vorversuch)
- E. Ersatzverfahren – Messergebnisse (Vorversuch)
- F. Volumensbestimmung – Ergebnisse (Vorversuch)
- G. Statische Verformungsmodule (Hauptversuch)
- H. Dynamische Verformungsmodule (Hauptversuch)
- I. Troxler Isotopsonde – Messergebnisse (Hauptversuch)
- J. Ersatzverfahren – Messergebnisse (Hauptversuch)
- K. Volumensbestimmung – Ergebnisse (Hauptversuch)
- L. Bilder Laborantentag



# Anhang A

# Report\_Loch

Processing Report  
12 April 2018



# Survey Data

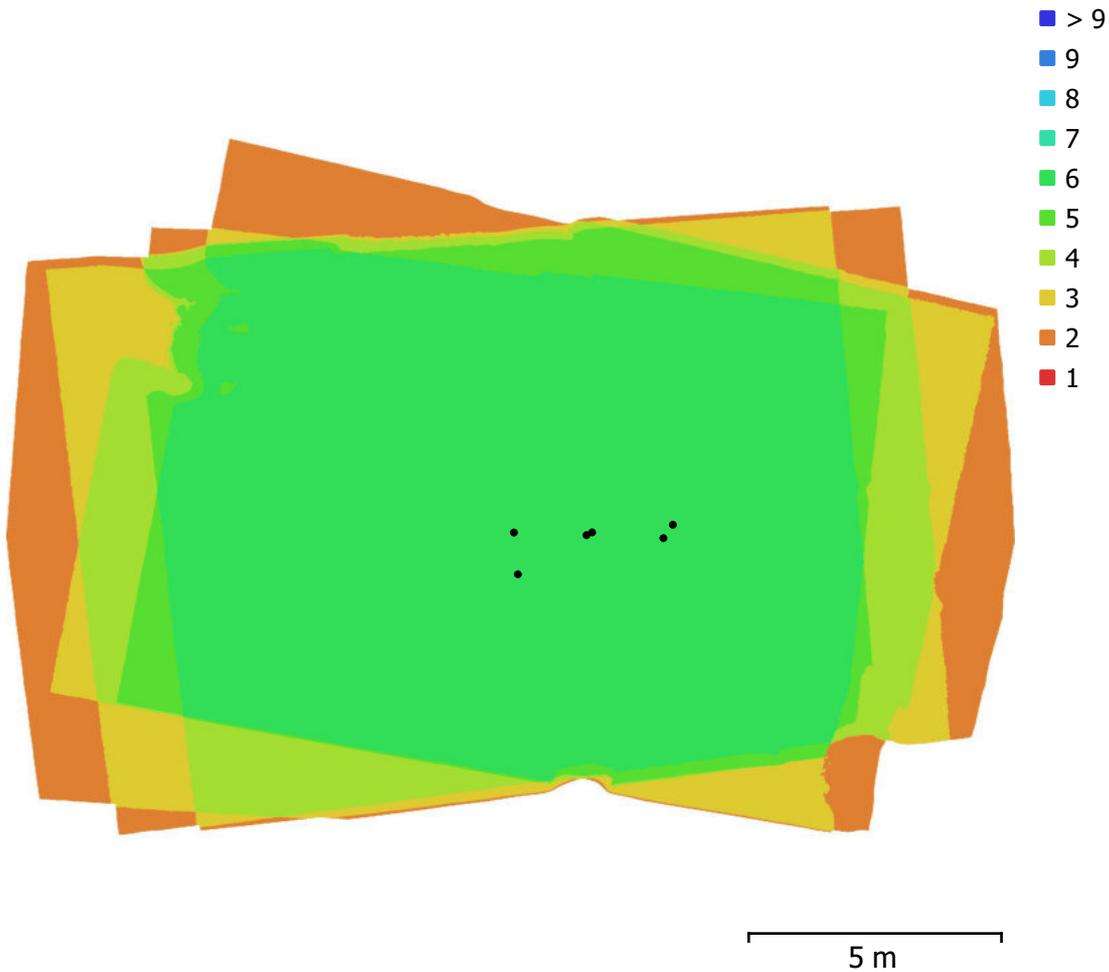


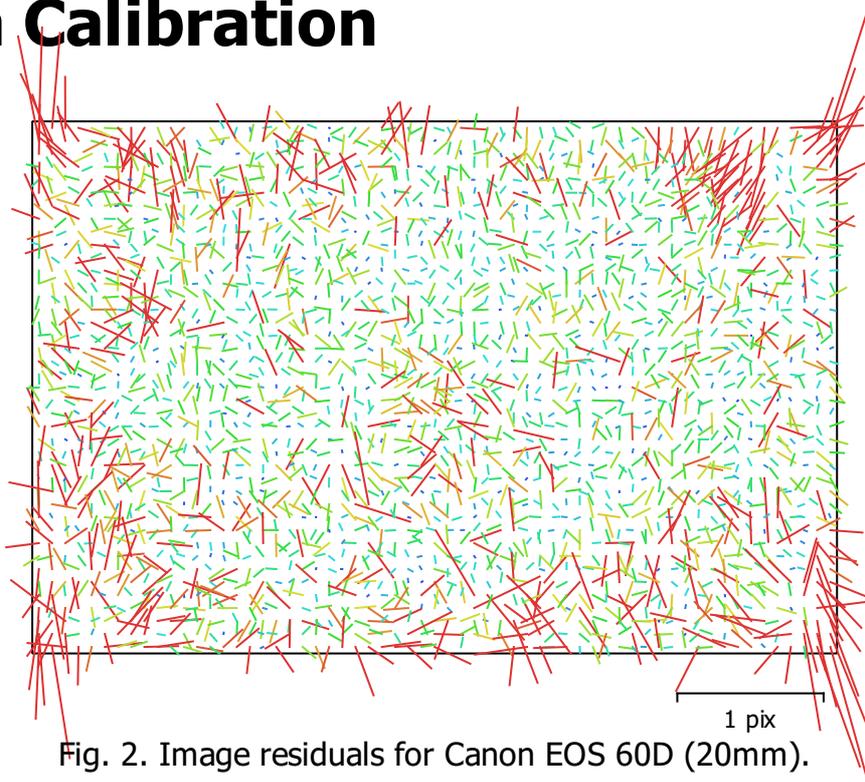
Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	6	Camera stations:	6
Flying altitude:	15.4 m	Tie points:	5,984
Ground resolution:	3.43 mm/pix	Projections:	23,969
Coverage area:	227 m <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.305 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 60D (20mm)	5184 x 3456	20 mm	4.4 x 4.4 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration



## Canon EOS 60D (20mm)

6 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5184 x 3456</b>	<b>20 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	B1	B2	K1	K2	P1	P2
<b>F</b>	<b>4475.54</b>	1.5	1.00	-0.03	-0.14	0.78	0.58	-0.30	-0.26
<b>B1</b>	<b>0.0322984</b>	0.031		1.00	0.06	-0.01	0.02	0.40	-0.21
<b>B2</b>	<b>0.0488517</b>	0.031			1.00	-0.09	-0.06	0.33	0.35
<b>K1</b>	<b>-0.0098486</b>	0.00014				1.00	0.13	-0.13	-0.14
<b>K2</b>	<b>0.0555353</b>	0.0002					1.00	-0.16	-0.09
<b>P1</b>	<b>0.000109539</b>	1.5e-05						1.00	0.13
<b>P2</b>	<b>-0.00249097</b>	1.2e-05							1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Ground Control Points

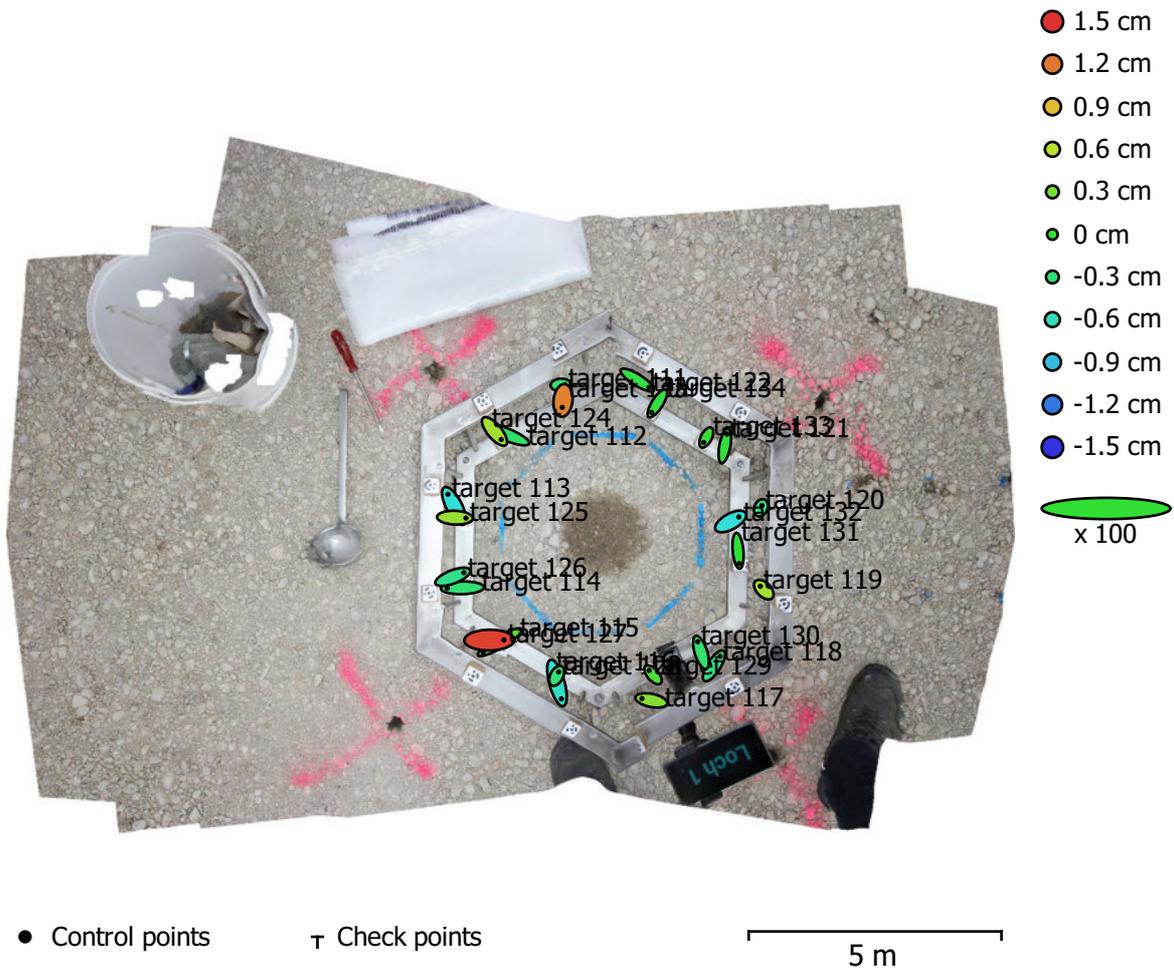


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
24	3.41071	3.05532	5.17615	4.57907	6.91089

Table 3. Control points RMSE.

<b>Label</b>	<b>X error (mm)</b>	<b>Y error (mm)</b>	<b>Z error (mm)</b>	<b>Total (mm)</b>	<b>Image (pix)</b>
target 111	1.57296	0.0826481	-2.67336	3.10288	0.066 (6)
target 112	-6.6579	2.71698	-2.5118	7.61701	0.084 (6)
target 113	-2.39633	4.65147	-7.10862	8.82672	0.149 (6)
target 114	-6.00589	-0.165714	-2.86643	6.65692	0.134 (6)
target 115	-6.60012	-3.96988	1.53774	7.85405	0.127 (6)
target 116	1.73672	-6.34243	-6.36881	9.15447	0.087 (6)
target 117	-3.72007	0.754634	3.58912	5.224	0.096 (6)
target 118	2.41817	3.8171	-3.38285	5.6446	0.088 (6)
target 119	-1.35589	1.36126	4.91906	5.28097	0.105 (6)
target 120	0.393563	0.920653	-3.46136	3.60326	0.101 (6)
target 121	0.893708	4.73116	-0.367475	4.82883	0.127 (6)
target 122	4.62783	-2.93608	-0.814712	5.54086	0.077 (6)
target 123	-0.300833	-2.78672	11.515	11.8512	0.108 (6)
target 124	2.68018	-3.22439	5.01244	6.53487	0.116 (6)
target 125	4.34845	-0.177759	4.4551	6.22805	0.129 (6)
target 126	4.39255	1.68805	-3.77646	6.03371	0.098 (6)
target 127	5.76008	0.0715774	14.3456	15.459	0.054 (6)
target 128	0.804663	1.56429	-2.96424	3.44691	0.090 (6)
target 129	-1.51874	1.75996	1.15738	2.59684	0.071 (6)
target 130	-1.31974	4.24494	-2.57925	5.13943	0.085 (6)
target 131	0.466247	-5.05308	-0.0172797	5.07457	0.048 (6)
target 132	3.223	1.7859	-7.19303	8.08188	0.103 (6)
target 133	-1.01429	-1.9649	0.336304	2.23668	0.100 (6)
target 134	-2.26207	-3.59989	-0.57362	4.29013	0.081 (6)
<b>Total</b>	<b>3.41071</b>	<b>3.05532</b>	<b>5.17615</b>	<b>6.91089</b>	<b>0.100</b>

Table 4. Control points.

# Digital Elevation Model

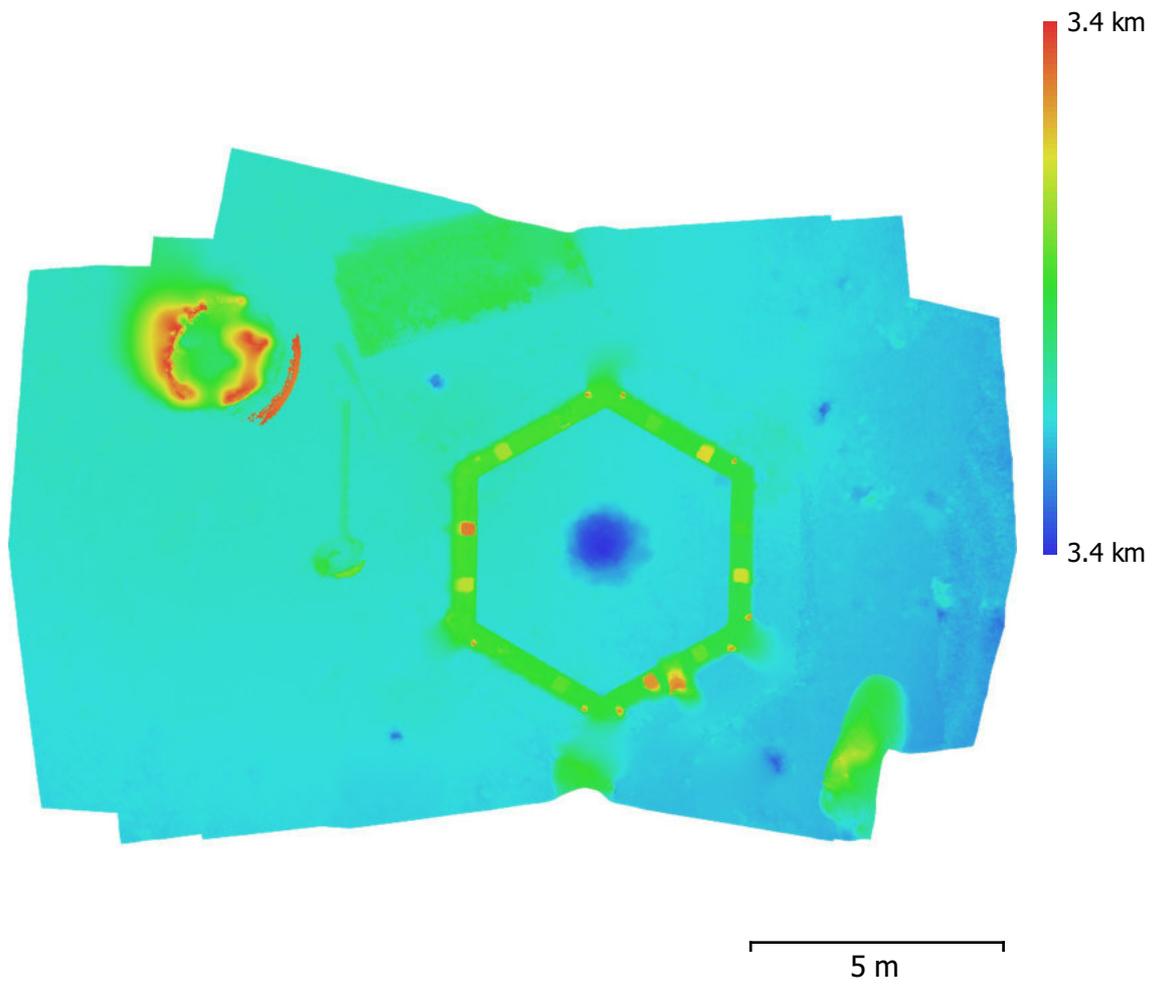


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.46 mm/pix  
Point density: 240 points/cm<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	6
Aligned cameras	6
Markers	24
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	5,984 of 6,246
RMS reprojection error	0.133276 (0.304595 pix)
Max reprojection error	0.585887 (4.17974 pix)
Mean key point size	2.35819 pix
Effective overlap	4.01921

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Matching time	20 seconds

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, k1, k2, p1, p2
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds

## DEM

Size	4,047 x 2,647
Coordinate system	Local Coordinates (m)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	4 seconds

## Orthomosaic

Size	6,179 x 4,299
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Channels	3, uint8

## Reconstruction parameters

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	24 seconds

## Software

Version	1.4.0 build 5650
Platform	Windows 64

# Anhang B

**Statischer Lastplattenversuch mit Lastplatte Ø  
300 mm nach ÖNORM B 4417**

Prüflabor	Ev1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Ev2 [MN/m <sup>2</sup> ]	Ev2/Ev1
1	74	250	3,4
2	54	196	3,6
3	52	188	3,6
4	56	173	3,1
5	55	180	3,3
6	56	180	3,2
7	66	214	3,2
8	74	214	2,9
9	50	180	3,6
10	56	205	3,6
11	64	161	2,5

# Anhang C

<b>dynamischer Lastplattenversuch mit Lastplatte Ø 300 mm</b>		
<b>Prüflabor</b>	<b>Evd,m [MN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Evd [MN/m<sup>2</sup>]</b>
<b>1</b>	62	62
<b>2</b>	50	50
<b>3</b>	46	46
<b>4</b>	50	50
<b>5</b>	66	66
<b>6</b>	54	53
<b>7</b>	47	47
<b>8</b>	53	53
<b>9</b>	53	53
<b>10</b>	50	50
<b>11</b>	43	43

# Anhang D

<b>Dichte- und Feuchtemessungen mit der Isotopsonde nach Troxler</b>					
<b>Prüflabor</b>	<b>Messstelle</b>	<b>Messtiefe [mm]</b>	<b>Feuchtdichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Trockendichte <math>\rho_d</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Wassergehalt w [M-%]</b>
1	1	nicht durchgeführt			
1	2	nicht durchgeführt			
1	3	nicht durchgeführt			
1	4	nicht durchgeführt			
2	1	200	2.36	2.28	3.4
2	2	200	2.36	2.29	3.4
2	3	200	2.40	2.33	3.0
2	4	200	2.38	2.31	3.3
3	1	200	2.38	2.30	3.1
3	2	200	2.32	2.25	3.0
3	3	200	2.31	2.23	3.3
3	4	200	2.26	2.19	3.2
4	1	200	2.21	2.14	3.2
4	2	200	2.22	2.15	3.4
4	3	200	2.20	2.13	3.2
4	4	200	2.19	2.12	3.1
5	1	200	2.26	2.17	4.2
5	2	200	2.28	2.21	3.3
5	3	200	2.27	2.20	3.4
5	4	200	2.27	2.20	3.1
6	1	200	2.30	2.23	3.6
6	2	200	2.31	2.23	3.7
6	3	200	2.31	2.24	3.3
6	4	200	2.31	2.23	3.5
7	1	200	2.25	2.19	2.9
7	2	200	2.24	2.17	3.0
7	3	200	2.25	2.19	3.0
7	4	200	2.29	2.22	3.0
8	1	nicht durchgeführt			
8	2	nicht durchgeführt			
8	3	nicht durchgeführt			
8	4	nicht durchgeführt			

<b>Dichte- und Feuchtemessungen mit der Isotopsonde nach Troxler</b>					
<b>Prüflabor</b>	<b>Messstelle</b>	<b>Messtiefe [mm]</b>	<b>Feuchtdichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Trockendichte <math>\rho_d</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Wassergehalt w [M-%]</b>
9	1	nicht durchgeführt			
9	2	nicht durchgeführt			
9	3	nicht durchgeführt			
9	4	nicht durchgeführt			
10	1	nicht durchgeführt			
10	2	nicht durchgeführt			
10	3	nicht durchgeführt			
10	4	nicht durchgeführt			
11	1	200	2.27	2.20	3.2
11	2	200	2.27	2.20	3.1
11	3	200	2.20	2.13	3.4
11	4	200	2.29	2.22	3.1



# Anhang E

**Bestimmung der Dichte des Bodens mittels Sandersatz bzw. Wasserersatz-Verfahren gemäß ÖNORM B 4414, Teil 2**

Prüflabor	Verfahren	Wassergehalt [%]	Dichte der feuchten Probe $\rho = mf/V$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte der trockenen Probe $\rho_d = \rho / (1+w)$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1	Wasserersatz	3,6	2,42	2,34
2	Densitometer	2,2	2,14	2,09
3	nicht durchgeführt			
4	Densitometer	2,6	2,23	2,17
5	Densitometer	3,1	2,23	2,16
6	Densitometer	3,1	2,25	2,18
7	Sand	2,9	2,23	2,17
8	Sand	2,6	2,30	2,24
9	Densitometer	3,5	2,26	2,18
10	Densitometer	3,4	2,23	2,16
11	Sand	2,4	2,13	2,08

# Anhang F

<b>Bestimmung des Volumens der Prüfgrube mittels Sandersatz bzw. Wasserersatz- Verfahren gemäß ÖNORM B 4414, Teil 2</b>			<b>SDD</b>
<b>Prüflabor</b>	<b>Verfahren</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>
<b>1</b>	Wasserersatz	2.658	2.555
<b>2</b>	Densitometer	971	824
<b>3</b>	nicht durchgeführt		
<b>4</b>	Densitometer	2.987	2.384
<b>5</b>	Densitometer	2.615	2.608
<b>6</b>	Densitometer	4.305	3.549
<b>7</b>	Sand	1.707	1.594
<b>8</b>	Sand	2.597	2.302
<b>9</b>	Densitometer	1.222	1.116
<b>10</b>	Densitometer	1.201	1.271
<b>11</b>	Sand	830	655

# Anhang G

## Statischer Lastplattenversuch mit Lastplatte Ø 300 mm nach ÖNORM B 4417

Prüflabor	Ev1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Ev2 [MN/m <sup>2</sup> ]	Ev2/Ev1
1.1	102	237	2.3
1.2	70	205	2.9
3.1	73	188	2.6
3.2	87	225	2.6
4.1	77	214	2.8
4.2	86	231	2.7
5.1	51	196	3.8
5.2	58	196	3.4
6.1	66	214	3.2
6.2	63	196	3.1
7.1	71	250	3.5
7.2	76	225	3.0
8.1	88	214	2.4
8.2	75	231	3.1
9.1	78	225	2.9
9.2	73	196	2.7
10.1	78	173	2.2
10.2	83	205	2.5
11.1	87	205	2.4
11.2	94	225	2.4
12.1	49	136	2.8
12.2	42	145	3.5
13.1	78	225	2.9
13.2	68	250	3.7

# Anhang H

**dynamischer Lastplattenversuch mit Lastplatte Ø 300 mm**

<b>Prüflabor</b>	<b>Evd,m [MN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Evd [MN/m<sup>2</sup>]</b>
1.1	58	58
1.2	50	50
1.3	63	63
1.4	52	52
3.1	49	49
3.2	59	59
3.3	51	51
3.4	52	52
4.1	64	64
4.2	62	62
4.3	64	64
4.4	68	68
5.1	59	59
5.2	53	52
5.3	52	51
5.4	54	53
6.1	63	63
6.2	78	79
6.3	67	67
6.4	70	70
7.1	79	82
7.2	72	73
7.3	70	71
7.4	80	83
8.1	58	58
8.2	58	58
8.3	58	58
8.4	67	67
9.1	56	56
9.2	56	56
9.3	54	54
9.4	66	66

## dynamischer Lastplattenversuch mit Lastplatte $\varnothing$ 300 mm

Prüflabor	Evd,m [MN/m <sup>2</sup> ]	Evd [MN/m <sup>2</sup> ]
10.1	71	71
10.2	66	66
10.3	54	54
10.4	61	61
11.1	69	69
11.2	71	71
11.3	76	76
11.4	79	79
12.1	68	68
12.2	72	72
12.3	75	75
12.4	62	62
13.1	72	72
13.2	60	60
13.3	64	64
13.4	67	67



# Anhang I

## Dichte- und Feuchtemessungen mit der Isotopsonde nach Troxler

Prüflabor	Messstelle	Messtiefe [mm]	Feuchtdichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Trockendichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt w [M-%]
1	1	nicht durchgeführt			
1	2	nicht durchgeführt			
1	3	nicht durchgeführt			
1	4	nicht durchgeführt			
3	1	250	2.27	2.21	2.8
3	2	250	2.17	2.11	2.7
3	3	250	2.21	2.16	2.6
3	4	250	2.26	2.19	2.8
4	1	250	2.18	2.11	3.4
4	2	250	2.25	2.20	2.4
4	3	250	2.19	2.14	2.3
4	4	250	2.22	2.16	2.4
5	1	250	2.14	2.07	3.2
5	2	250	2.11	2.07	2.3
5	3	250	2.17	2.12	2.5
5	4	250	2.12	2.06	2.6
6	1	250	2.14	2.08	3.0
6	2	250	2.16	2.10	3.1
6	3	250	2.24	2.17	3.2
6	4	250	2.25	2.18	3.4
7	1	250	2.28	2.20	3.5
7	2	250	2.21	2.14	3.1
7	3	250	2.26	2.21	3.4
7	4	250	2.22	2.16	2.8
8	1	nicht durchgeführt			
8	2	nicht durchgeführt			
8	3	nicht durchgeführt			
8	4	nicht durchgeführt			
9	1	nicht durchgeführt			
9	2	nicht durchgeführt			
9	3	nicht durchgeführt			
9	4	nicht durchgeführt			

### Dichte- und Feuchtemessungen mit der Isotopsonde nach Troxler

Prüflabor	Messstelle	Messtiefe [mm]	Feuchtdichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Trockendichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt w [M-%]
10	1	nicht durchgeführt			
10	2	nicht durchgeführt			
10	3	nicht durchgeführt			
10	4	nicht durchgeführt			
11	1	250	2.27	2.19	3.8
11	2	250	2.21	2.14	3.7
11	3	250	2.23	2.14	4.0
11	4	250	2.23	2.15	3.9
12	1	250	2.24	2.18	2.7
12	2	250	2.15	2.10	2.4
12	3	250	2.21	2.15	2.5
12	4	250	2.14	2.09	2.4
13	1	nicht durchgeführt			
13	2	nicht durchgeführt			
13	3	nicht durchgeführt			
13	4	nicht durchgeführt			



# Anhang J

**Bestimmung der Dichte des Bodens mittels Sandersatz bzw. Wasserersatz-Verfahren gemäß ÖNORM B 4414, Teil 2**

<b>Prüflabor</b>	<b>Verfahren</b>	<b>Wassergehalt [%]</b>	<b>Dichte der feuchten Probe <math>\rho = mf/V</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Dichte der trockenen Probe <math>\rho_d = \rho / (1+w)</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>
1.1	Wasserersatz	3.0%	2.40	2.29
1.2	Wasserersatz	3.7%	2.33	2.21
4	Densitometer	2.6%	2.25	2.19
5.1	Densitometer	2.5%	2.21	2.15
5.2	Densitometer	2.5%	2.21	2.15
6.1	Densitometer	2.7%	2.36	2.30
6.2	Densitometer	2.6%	2.32	2.27
7.1	Sandersatz	2.8%	2.19	2.13
7.2	Sandersatz	3.1%	2.18	2.12
8.1	Sandersatz	2.3%	2.27	2.22
8.2	Sandersatz	2.5%	2.27	2.22
9.1	Densitometer	2.5%	2.25	2.20
9.2	Densitometer	2.7%	2.26	2.20
11.1	Sandersatz	3.2%	2.28	2.21
11.2	Sandersatz	3.3%	2.28	2.20
12.1	Sandersatz	2.1%	2.25	2.20
12.2	Sandersatz	2.3%	2.21	2.16

# Anhang K

<b>Bestimmung des Volumens der Prüfgrube mittels Sandersatz bzw. Wasserersatz- Verfahren gemäß ÖNORM B 4414, Teil 2</b>			<b>SDD</b>
<b>Prüflabor</b>	<b>Verfahren</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>
<b>4</b>	Densitometer	3,339	3,092
<b>5.1</b>	Densitometer	3,230	2,857
<b>5.2</b>	Densitometer	2,840	2,670
<b>9.1</b>	Densitometer	2,619	2,243
<b>11.1</b>	Sandersatz	2,719	2,500

<b>Vergleichsmessung an einer Prüfgrube</b>		
<b>Prüflabor (chronologische h)</b>	<b>Verfahren</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>
<b>9</b>	Densitometer	3,929
<b>4</b>	Densitometer	4,041
<b>6</b>	Densitometer	4,156
<b>5</b>	Densitometer	3,993
<b>12</b>	Sandersatz	4,216

# Anhang L

# Prüffeld 1



# Prüffeld 2



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

# Statische & Dynamische Lastplatte



# Wasserersatzverfahren & Densitometer



# Sandersatzverfahren



# Stahlkugellersatzverfahren





# Troxler Isotopensonde



# SDD



