

Untersuchung zur Verdichtbarkeit von natürlichen Böden für Mountainbike-Strecken

Masterarbeit an der Fakultät für Technische Wissenschaften,
Universität Innsbruck

Matthias Steinmayr, BSc

Innsbruck, 10. September 2019

Masterarbeit

eingereicht an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für
Technische Wissenschaften zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Diese Masterarbeit ist der Vertiefungsrichtung „Geotechnik, Vermessung und
Wasserbau“ des Masterstudiums Umweltingenieurwissenschaften zugeordnet.

Beurteiler:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Fellin

Institut für Infrastruktur

Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau

Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Fellin , Universität
Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Geotechnik und
Tunnelbau

Mitbetreuer: Extern: Dipl.-Ing. Dr. techn. Christoph Matzke,

Dipl.-Ing. Dr. techn. Barbara Schneider-Muntau, Universität Innsbruck,
Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau

Danksagung

Ich möchte mich beim Arbeitsbereich Geotechnik für die Bereitstellung der Ressourcen und beim gesamten Team für die Unterstützung bedanken. Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Dr. techn. Barbara Schneider-Muntau und Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Fellin für die gute Betreuung und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Ein großes Dankeschön gilt Dipl.-Ing. Dr. techn. Christoph Matzke für die tatkräftige Mitarbeit, die guten Ratschläge und die Bereitstellung der Geräte.

Meiner Lebensabschnittspartnerin Lisa ein aufrichtiges Dankeschön für deinen ständigen Rückhalt und das engagierte Korrekturlesen.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, die mir stets ihre Liebe und Beistand zukommen lässt.

Auch allen Freunden und Wegbegleitern, die zum Gelingen der Arbeit einen Beitrag geleistet haben, sei gedankt.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Verdichtung von natürlichen Böden, welche Baustoff und Baugrund für Mountainbike (MTB)-Strecken sind. Mit natürlichen Böden ist das Erdmaterial gemeint, welches sich jeweils vor Ort befindet und nicht speziell in eine Kieswerk hergestellt wird.

Die Folgen einer mangelhaften Verdichtung der Tragschichten können Bodenerosion, Schlaglöcher, Brems- und Spurrillenbildung sein. Um die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der MTB-Strecken dauerhaft zu verbessern ist eine ausreichende Verdichtung des Bodens notwendig. Im Straßenbau gelten Richtlinien und Normen, im MTB-Streckenbau gibt es bis dato noch keine gültigen Richtlinien. An diese Ausgangssituation schließt diese Arbeit an und soll einen Beitrag zu Verbesserung der Bodenverdichtung an MTB-Strecken leisten.

Zu diesen Zweck werden gezielt Bodenproben von Strecken entnommen und nach dem aktuellem Stand der Technik untersucht. Daraus werden Erkenntnisse über den Verlauf der Körnungslinie, den Anteilen an organischen Bestandteile und dem optimalem Wassergehalt beim Verdichten gewonnen. Vier der fünf Bodenproben stammen von MTB-Strecken, die aus natürlich gewachsenen Böden errichtet wurden. Eine Probe ist von einer Strecke, die mit Fremdmaterial errichtet wurde. Diese werden in der Arbeit gegenübergestellt und auf Unterschiede untersucht.

Darüber hinaus werden Verformungsmessungen mit einer dynamischen Lastplatte an Strecken durchgeführt. Diese Messungen stellen einen experimentellen Ansatz zum Bewerten der Qualität und des Grades der Verdichtung an MTB-Strecken dar. Die Messdaten werden statistisch analysiert und interpretiert. Unter der Berücksichtigung dieser Analysen, der durchgeführten Messungen an kreuzenden Forst- und Wanderwegen und der Laborergebnisse können Rückschlüsse über den Zustand von MTB-Strecken getroffen werden.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wird eine Empfehlung für die Anforderungen an den Verformungsmodul bei der Verdichtungskontrolle mit der dynamischen Lastplatte für MTB-Strecken gemacht.

Die Bodenproben werden laut Klassifikation alle der gemischtkörnigen und weitgestuften Bodengruppe zugeordnet und weisen einen durchschnittlichen organischen Anteil von 4 - 5% auf. Der optimale Wassergehalt zur guten Verdichtbarkeit der untersuchten Böden kann zwischen 10 - 15 % festgelegt werden. Die gemessenen Verformungsmodule streuen stark entlang der Strecken. Eine Steigerung des Verdichtungsgrades der Tragschichten von MTB-Strecken ist durchaus möglich.

Eine ausreichend verdichtete MTB-Strecke sollte mindestens einen Verformungsmodul von 15 MN/m^2 für alle Messungen mit der dynamischen Lastplatte erreichen.

Abstract

The present thesis deals with the compaction of natural soils. These soils are used as construction material and building ground for mountain bike (MTB) trails. Due to the lack of sufficient compaction of the base layers, soil erosion, potholes, brake and ruts formation can occur. In order to improve the load bearing capacity and durability of the MTB-trails permanently, an adequate compaction of the soil is necessary. In road construction guidelines and standards are applied. For the constructions of trails valid guidelines are not available yet. Taking up this situation, the aim of the following work is to contribute to the improvement of soil compaction for MTB-trails.

Therefore, selected soil samples from different MTB-trails are collected and tested according to the current state of the art. This will provide important information about the grading curve, the amount of organic materials and the optimum water content in order to optimise the compaction of the soils. Thereby four of the five samples are natural soils, the fifth is obtained from a trail build with an imported material. These samples are compared among each other and investigated for significant differences.

Furthermore, measurements of deformation on trails are carried out with a dynamic load plate. These measurements represent an experimental approach to assess the quality and degree of compaction for MTB-trails. The measured data are statistically analysed and interpreted. Considering these analyses, the occurred reference measurements and the laboratory results, it enables to draw several conclusions about the condition of MTB-trails. Thereby, a proposal for the dynamic deflection module requirements for testing with the dynamic load plate is given, based on the obtained knowledge.

According to the classification, the soil samples tested can be assigned to a mixed grained and large staged soil group. These samples contain an average organic content of 4 - 5 %. For good compaction the optimum water content can be set between 10 - 15 %.

The measured deformation modules strongly differ along the trails. Generally, an increase in the degree of compaction for the base course of the trails seems feasible.

For all measurements with a dynamic load plate, a sufficiently compacted MTB trail should achieve at least a dynamic modulus of 15 MN/m^2 .

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsfrage und Ziele	1
1.1	Einführung	1
1.2	Forschungsfragestellung	1
1.3	Zielsetzung	2
1.4	Gliederung	2
2	Grundlagen-Theorieteil	3
2.1	Vorbemerkung	3
2.2	Der Boden	3
2.3	Definition bodenmechanischer Kennwerte	4
2.4	Festigkeit des Bodens	5
2.5	Verdichtbarkeit von Boden	6
2.6	Verdichtungsgeräte	7
2.7	Verformungsmodul	7
2.8	Einflüsse auf die Bodensteifigkeit	8
3	Methoden	11
3.1	Vorbemerkung	11
3.2	Benennung, Beschreibung und Klassifizierung	11
3.2.1	Korngrößenbereiche	12
3.2.2	Bodenansprache in Situ	13
3.2.3	Korngrößenverteilung	14
3.2.4	Beschreibung und Darstellung der Kornfraktionen	15
3.2.5	Plastische und organische Bestandteile	15
3.3	Sieb- und Schlämmanalyse	16
3.3.1	Aufbau des Versuches	17
3.3.2	Durchführung des Versuches	17
3.3.3	Auswertung des Versuches	18
3.4	Proctor Versuch	18
3.4.1	Aufbau des Versuches	19
3.4.2	Durchführung des Versuches	20
3.4.3	Auswertung des Versuches	20
3.5	Kompressionsversuch	21
3.5.1	Aufbau des Versuches	21
3.5.2	Durchführung des Versuches	22
3.5.3	Auswertung des Versuches	22
3.6	Glühverlust	23
3.6.1	Durchführung des Versuches	23
3.6.2	Auswertung des Versuches	23

3.7	Dynamischer Lastplattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (dLFG) . . .	24
3.7.1	Aufbau des Versuches	24
3.7.2	Durchführung des Versuches	25
3.7.3	Versuchsauswertung	26
3.7.4	Korrelation von dynamischen und statischen Verformungsmoduln	27
4	Durchführung, Auswertung und Interpretation der Labor Versuche	29
4.1	Vorbemerkung	29
4.2	Bodenproben	29
4.2.1	Auswahl der Bodenproben	29
4.2.2	Probenentnahme	31
4.2.3	Durchführung der Sieb- und Schlämmanalyse	31
4.2.4	Klassifikation der Bodenproben	32
4.2.5	Ergebnisse und Erkenntnisse	35
4.3	Durchführung und Auswertung der Proctor-Versuche	35
4.3.1	Durchführung der Proctor Versuche	35
4.3.2	Ermittlung der Trockendichten und Wassergehaltes	37
4.3.3	Vergleiche mit der Literatur	38
4.3.4	Ergebnisse und Erkenntnisse	39
4.4	Auswertung der Kompressionsversuche	40
4.4.1	Durchführung	40
4.4.2	Ergebnisse der Steifemoduln	41
4.4.3	Vergleichswert	42
5	Auswertung und Vergleich der Messdaten mit der dynamischen Lastplatte	43
5.1	Vorbemerkung	43
5.2	Durchführung der Messungen	43
5.3	Übersicht über die Messergebnisse	44
5.4	Messergebnisse entlang der Strecke	46
5.5	Datenanalyse und statistische Auswertung	48
5.6	Umrechnung der Verformungsmoduln	48
5.7	Vergleich zwischen Labor- und Messergebnisse	49
5.8	Vergleich Doppelmessungen	51
5.9	Anforderungen bei Verdichtungskontrollen mittels der dLFG	52
5.10	Ergebnisse und Erkenntnisse	54
6	Zusammenfassung und Ausblick	57
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	57
6.2	Anmerkungen zur Arbeit	58
6.3	Weitere Forschungsfragen	58
	Abbildungsverzeichnis	60
	Tabellenverzeichnis	62
	Literaturverzeichnis	63
A	Anhang	65
A.1	Protokolle der Laborversuche	65
A.1.1	Protokolle der Sieb- und Schlämmanalysen	65
A.1.2	Protokolle der Proctorversuche	71

INHALTSVERZEICHNIS

A.1.3	Protokolle der Glühversuche	77
A.1.4	Protokolle der Kompressionsversuche	83
A.2	Auswertung der Messungen mit der dynamischen Lastplatte	96

1 Forschungsfrage und Ziele

1.1 Einführung

Der Mountainbike-Sport erfreut sich immer größerer Beliebtheit als Freizeitaktivität sowohl zur Erholung als auch zum Vergnügen. Die rasanten technischen Entwicklungen neuer MTB-Räder und der aufkommende E-Bike Trend tragen dazu bei, dass diese Sportart immer größere Massen anspricht. Das "Mountainbiken" gehört nach Wandern und Klettern zu den beliebtesten Sportarten im alpinen Raum außerhalb der Wintersaison.

Der Mountainbike-Sektor ist ein stark wachsender und erfolgversprechender Zweig im alpinen Tourismus. Die zu erwartenden Klimaänderungen und bereits spürbaren Auswirkungen im Wintertourismus, stellen Betreiber von Aufstiegsanlagen vor die Herausforderung, sich nach einer nachhaltigen Nutzung der bestehenden Infrastruktur umzusehen.

Die steigende Nachfrage an MTB-Infrastrukturen von Seiten der Biker, des Tourismus und der Betreiber von Anlagen, lässt auch die technischen und wirtschaftlichen Ansprüchen steigen.

Im Bundesland Tirol wurde im Rahmen des „MTB 2.0 Modell“ ein „Trailbauhandbuch“ veröffentlicht. Dieser Leitfaden enthält grundsätzliche Anforderungen, Planungs- und Sicherheitsstandards für den Neubau, den Ausbau und für Förderungsmöglichkeiten von MTB-Infrastrukturen [1]. Bezüglich einer hinreichenden Verdichtung des Untergrundes finden sich jedoch keine Vorschriften und Empfehlungen.

1.2 Forschungsfragestellung

Bodenerosion, Schlaglöcher, Bremsrillen- und Spurrillenbildung können Folgen einer unzureichenden Verdichtung des Baugrundes von MTB-Strecken sein. Um die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von MTB-Strecken zu verbessern ist eine Verdichtung des Bodens notwendig.

Im Straßenbau sind diesbezüglich im Laufe der Zeit eine Reihe von Richtlinien und Normen entstanden. Im MTB-Streckenbau liegen bis dato noch keine allgemeingültigen Richtlinien für das Ausführen von fachgerechten Verdichtungsarbeiten vor.

An dieser Ausgangssituation schließt die vorliegende Arbeit an. Die Qualität und der Grad der Verdichtung von mehreren MTB-Strecken wurde mithilfe Verformungsmessungen mit einer dynamischen Lastplatte untersucht. Um die Ergebnisse der dynamischen Lastplatte einordnen und vergleichen zu können, werden von ausgewählten Strecken Bodenproben entnommen und nach dem Stand der Technik im Labor untersucht. Im MTB-Streckenbau werden hauptsächlich natürlich gewachsene Böden als Baustoff und Baugrund eingesetzt. Diese gilt es jetzt auf ihrer Eignung zu Prüfen und Ansätze zur Verbesserung und Vereinheitlichung der Verdichtungsqualität zu treffen.

1.3 Zielsetzung

Konkret soll diese Arbeit eine Unterstützung zum Errichten und Beurteilen von qualitativ hochwertigen und dauerhaft gut verdichteten MTB-Strecken sein. Primär richtet sie sich an spezialisierte Trailbau-Unternehmen, an Betreiber von MTB-Strecken sowie an Institutionen zur Vergabe von Förderungen. Ziel ist es, mit der Bearbeitung nachfolgender Punkte einen Beitrag zur Verbesserung der Qualität an Bodenverdichtung für MTB-Strecken zu leisten.

- **Klassifikation der entnommenen Bodenproben**

Eine Auswahl an natürlich gewachsenen Böden wird auf ihre Eignung als Baustoff und Baugrund für MTB-Strecken untersucht. Hierfür werden allgemein gültige Laboruntersuchungen der Geotechnik angewandt. Anhand der Zusammensetzung und dem Verlauf der Kornverteilungslinie werden die Proben in Bodengruppen eingeteilt.

- **Untersuchungen zur Verdichtbarkeit der Bodenproben**

Mit den Proctor-Versuchen wird die Beziehung zwischen dem optimalen Wassergehalt und der maximalen erzielbaren Trockendichte hergestellt. Daraus werden Anhalts- und Grenzwerte zum guten Verdichten in der Praxis bestimmt.

- **Analyse der Verformungsmessungen mit der dynamischen Lastplatte**

Anhand der statistischen Auswertung und Analyse der Verformungsmessungen und durch Gegenüberstellung mit den Laborergebnissen werden Rückschlüsse auf die Qualität und den Grad der Verdichtung von MTB-Strecken getroffen.

- **Anforderungen an dem Verformungsmodul bei Verdichtungskontrollen**

Um die dynamische Lastplatte als Werkzeug der Verdichtungskontrolle zielgerecht einsetzen zu können, müssen treffende Kriterien zur Bewertung definiert werden. Es wird ein Vorschlag für die Mindestanforderungen bei der Überprüfung des Verdichtungszustandes mit der dynamischen Lastplatte ausgearbeitet.

1.4 Gliederung

Diese Arbeit setzt sich aus drei wesentlichen Teilen zusammen. Im ersten Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen, welche zum tieferen Verständnis der Arbeit notwendig sind, zusammengetragen.

Im zweiten Teil (Kapitel 3) werden die durchgeführten Versuche und eingesetzten Geräte vorgestellt und beschrieben.

Im dritten Teil (Kapitel 4 und Kapitel 5) der Arbeit werden die konkrete Durchführung, die Auswertungen und die Ergebnisse präsentiert. Jeder Abschnitt endet mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnissen und Erkenntnissen.

2 Grundlagen-Theorieteil

2.1 Vorbemerkung

Dieses Kapitel beinhaltet einen Überblick über die theoretischen Grundlagen und wichtige Bodenkennwerte, welche zum tieferen Verständnis der Arbeit von Bedeutung sind. Es wird nur auf Themen eingegangen, die direkt in der Arbeit vorkommen oder unmittelbar damit in Verbindung stehen. Auf weiterführende und detailliertere Grundlagen wird verwiesen.

2.2 Der Boden

Boden ist ein sogenanntes Dreistoffgemisch (siehe Abb. 2.1) und setzt sich aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen zusammen. Das Volumen des Bodens (vergleiche Abb. 2.2) setzt sich aus einer Festmasse V_s (*solid*) und Hohlräumen V_p (*pores*) zusammen. Dabei besteht die Festmasse aus mineralischen Partikeln mit unterschiedlichen Durchmessern, sie bilden das Korngerüst. Die Hohlräume, auch Poren genannt, können ganz oder nur teilweise mit Wasser V_w gefüllt sein. Der übrige Anteil an Porenraum ist mit Luft V_l gefüllt. Die Eigenschaften eines Bodens werden maßgeblich durch diese Zusammensetzung bestimmt. [2]

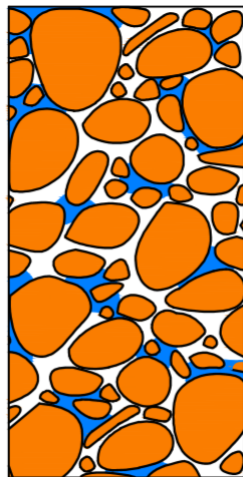


Abbildung 2.1: Boden als Dreistoffgemisch (Modellvorstellung)

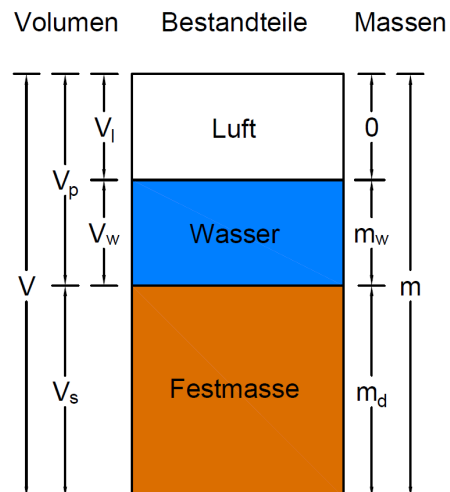


Abbildung 2.2: Bestandteile von Boden

Boden wird auch als ‐Lockergestein‐ bezeichnet und entsteht durch die Zersetzung von Festgestein. Die oberste, organische Deckschicht (Humus) gehört laut bodenmechanischer Definition [3] nicht zum Boden. Das Verhalten des Bodens wird auf Basis der physikalischen Eigenschaften eines Bodens und mit Hilfe von Gesetzen der Mechanik und Hydraulik z.B. beschrieben. [4, 5]

Es ist wichtig zu betonen, dass sich der Begriff Boden in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich auf natürlich gewachsene Böden bezieht. Definitionsgemäß sind dies unberührte Böden, welche durch natürliche Verwitterung entstanden sind.

2.3 Definition bodenmechanischer Kennwerte

Es folgt eine Reihe von Definitionen einiger bodenmechanischen Kennwerten, die in der vorliegenden Arbeit vorkommen. Die Abbildung 2.2 kann zum Verständnis der Definitionen hilfreich sein.

Dichte ist in Verbindung mit der Verdichtung von Böden eine der wichtigsten Kenngrößen. Bezogen auf einem Bodenkörper können unterschiedliche Dichten definiert werden.

Die (feucht) Dichte ρ eines Bodens ist das Verhältnis von (feuchter) Masse m zu Volumen V der Probe.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2.1)$$

Die Trockendichte ρ_d ist die Masse m_d der getrockneten Bodenprobe bezogen auf das Gesamtvolumen V der Probe. Dabei wird die Bodenprobe bis zur Gewichtskonstanz bei 105  C für mindestens 24 h bis zur Massenkonzanz im Trockenschrank getrocknet.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2.2)$$

Die Korndichte ρ_s ist die trockene Masse m_d der festen Bestandteile des Bodens bezogen auf das Volumen der Festmasse V_s .

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_s} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2.3)$$

Der Wassergehalt w einer Bodenprobe ist das Verhältnis der Masse des Wassers m_w in der Bodenprobe zur Trockenmasse m_d . Er wird durch Trocknen der Probe bestimmt. Der Wassergehalt hat auf die technischen Eigenschaften des Bodens einen großen Einfluss. Besonders bei der Verdichtbarkeit von Böden ist der Wassergehalt von Bedeutung.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (2.4)$$

Bei Kenntnis des Wassergehaltes w lässt sich die Trockendichte ρ_d aus der (feuchten) Dichte ρ des Bodens berechnen:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100}} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2.5)$$

Das Gesamtvolumen V eines Bodens setzt sich, wie bereits erwähnt, aus dem Volumen der Festmasse V_s und dem Volumen der Poren V_p zusammen. Der Porenanteil (Porosität) n , ist das Verhältnis des Hohlraumvolumens V_p zum Gesamtvolumen V .

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V_p}{V_p + V_s} = \frac{V - V_s}{V} \quad [-] \quad (2.6)$$

Oder auch über die Dichten ausgedrückt:

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad [-] \quad (2.7)$$

Die Porenzahl e ist das Verhältnis vom Porenvolumen V_p zum Volumen des Feststoffes V_s .

$$e = \frac{V_p}{V_s} \quad [-] \quad (2.8)$$

Porenanteil n und Porenzahl e stehen in folgenden Beziehungen:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad \text{oder} \quad e = \frac{n}{1 - n} \quad [-] \quad (2.9)$$

Der Sättigungsgrad S_r eines Bodens ist das Verhältnis des mit Wasser gefüllten Porenraums V_w zum Gesamtporenvolumen V_p . Bei einem Sättigungsgrad von 100 % sind alle Poren vollständig mit Wasser gefüllt.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{oder} \quad S_r = \frac{w}{\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s}} \quad [\%] \quad (2.10)$$

2.4 Festigkeit des Bodens

Der (mechanische) Widerstand der Bodenpartikel gegen die gegenseitige Verschiebung (Abscheren), ist der maßgebende Prozess zur Beschreibung der Festigkeit. Diese Festigkeit eines Bodens lässt sich auf die Scherfestigkeit τ_{Scher} zurückführen. Wird diese Festigkeit durch Beanspruchung einer Last überschritten, kann es zum Versagen des Bodens kommen. Bleibende Verformungen sind dabei die Folge. Das Coulomb'sche Reibungsgesetz (1776) (siehe Formel 2.11) bildet die Grundlage zur Erfassung der Scherfestigkeit von Böden.

$$\tau_{\text{Scher}} = c + \sigma_N \cdot \tan \varphi \quad (2.11)$$

Dabei ist die Scherfestigkeit τ_{Scher} eine Funktion der Normalspannungen σ_N abhängig von den Parametern: Reibungswinkel φ und Kohäsion c . Die Reibungsfestigkeit ist abhängig vom inneren Reibungswinkel φ der Bodenpartikel und der wirkenden Normalspannung σ_N . Die innere Reibung wird erst durch eine äußere Beanspruchung aktiviert. [3]

In der praktischen Anwendung des Reibungsgesetzes wird die Scherfestigkeit als Ganzes betrachtet (siehe Formel: 2.11). [4]

2.5 Verdichtbarkeit von Boden

Für die Standsicherheit des Baugrundes und dauerhafte Gebrauchstauglichkeit von Erdbauwerken ist eine ausreichende Verdichtung eine grundlegende Voraussetzung.

Durch die Verdichtung wird das Porenvolumen der Böden verringert. Dies hat die Erhöhung der Trockendichte zur Folge. Infolge der dichteren Lagerung der Bodenpartikel, erhöht sich die Peak-Tragfähigkeit und die Peak-Scherfestigkeit. Gleichzeitig wird die Verformungsfähigkeit und Durchlässigkeit des Bodens verringert. Im Wege- und Straßenbau wird aus diesem Grund der ausreichenden Verdichtung von Untergrund und Befestigungsschichten große Bedeutung gewidmet.[4]

Der Verdichtungserfolg hängt stark von folgenden Punkten ab:

- den bodenmechanischen Eigenschaften (z.B. Lagerungsdichte, Wassergehalt);
- dem vorhandenen Wassergehalt;
- den eingesetzten Verdichtungsgeräten;
- der Schütthöhe der zu verdichtenden Schicht;
- der Anzahl der Übergänge mit dem Verdichtungsgerät;
- der Arbeitsgeschwindigkeit des Verdichtungsgerätes;
- der Amplitude und Frequenz der dynamischen Verdichtungsgeräte;
- dem Betriebsgewicht von Verdichtungsgeräten, etc. [6];

Einen großen Einfluss auf die Verdichtbarkeit der zu verdichteten Schicht hat der Untergrund auf dem diese geführt wird. Die MTB-Strecken werden häufig im Einschnitt des Geländes (siehe Abb. 2.3) geführt. Besonders beim Bau solcher Aufschüttungen und Dämme ist eine ausreichende Verdichtung sehr zu empfehlen. Wird die Tragschicht auf dem natürlich gewachsen Boden im Einschnitt des Geländes geführt ist eine ausreichende Verdichtung des Untergrundes weniger von Bedeutung. Der Untergrund ist durch seine natürliche Lagerung bereits konsolidiert.

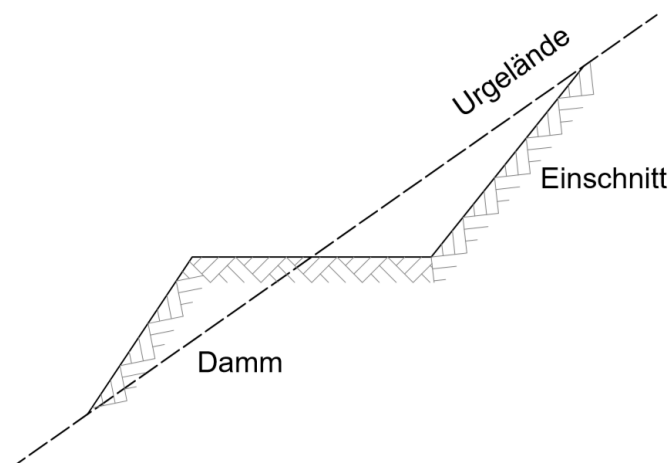


Abbildung 2.3: Damm und Einschnitt im Gelände

Einen weiteren Einfluss auf die Verdichtungs- und Verformungseigenschaften, hat das Mengenverhältnis zwischen den feinen und groben Körnern im Boden. Ein nicht bindiges Verhalten liegt vor, wenn das Feinkorn genügen Platz in den Poren zwischen den Grobkörnern findet. Ist das Volumen der Feinkörner größer als der Porenraum der Grobkörner, herrscht meist bindiges Verhalten vor. In diesen Fall spielt der Wassergehalt eine entscheidende Rolle für die Eigenschaften. Bei viel Feinanteil besitzen die Böden eine größere spezifische Oberfläche ihrer Einzelkörner und dadurch einen größerer Wasserbindefähigkeit und höhere Kohäsion. Die Größe des Porenraumes der Grobkörner hängt von der Kornabstufung

ab. Deshalb werden ihre Verdichtungs- und Verformungseigenschaften maßgeblich von ihrem Wassergehalt bestimmt. Die erreichbare Trockendichte nimmt bei gleich großer Verdichtungsarbeit mit steigenden Grobkornanteil zu. [6] Die Kornform der einzelnen Körner hat auch einen Einfluss auf die Verdichtungseigenschaften eines Bodens. Die Kornform der Bodenproben wurden nicht näher betrachtet. Generell können eckige Körner im eingebauten Zustand, durch die Verkantung und Verzahnung gegeneinander eine höhere Festigkeit erreichen.

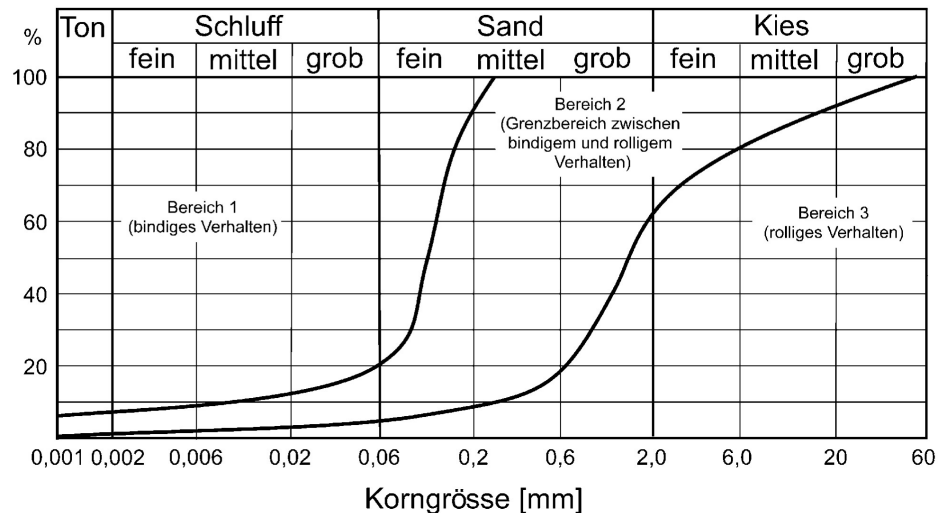


Abbildung 2.4: Bereichsgrenzen für rolliges und bindiges Verhalten [7]

2.6 Verdichtungsgeräte

Zur Verdichtung von Böden kommen dynamisch oder statisch wirkende Geräte zum Einsatz. Die Verdichtungsenergie wird über die Geräte in den Boden eingetragen. Im Gegensatz zu den statischen Verdichtungsgeräten werden dynamische Verdichtungsgeräte wegen der hohen Leistungsfähigkeit häufiger verwendet. Die Verdichtung beruht darauf, den Boden durch Stampfen und Vibrations- oder Oszillationsschwingungen zu bewegen, sodass dieser eine dichtere Lagerung einnimmt. Zu den dynamischen Verdichtungsgeräten gehören: Walzzüge, Vibrationsplatten, Schnellschlag- und Fallplattenstampfer. Diese Verdichtungsgeräte eignen sich besonders für räumlich begrenzte Einsatzgebiete und zur Oberflächenverdichtung von geeigneten Böden. Weitere Vorteile sind ihr verhältnismäßig geringes Gewicht und ihre Wendigkeit. Für den Bau von MTB-Strecken eignen sich wegen der Baustellenverhältnisse (beschränkte Platzverhältnisse und Verlauf durch steiles Gelände) die dynamischen Verdichtungsgeräte besser. [6]

2.7 Verformungsmodul

Dieser Parameter wird zur Beurteilung der Steifigkeit und des Setzungsverhaltens von Böden verwendet. Die Bodenprobe wird mit einer Druckvorrichtung stufenweise be- und entlastet. Dabei werden die wirkenden Spannungen σ_N und die dazugehörigen Setzungen s aufgezeichnet. Die Ergebnisse lassen sich in einem Druck-Setzungs-Diagramm (siehe Abb. 2.5) darstellen. Für die Kurve der Erstbelastung ergibt sich ein Erstbelastungsmodul E_{v1} und für die erneute Belastung der Wiederbelastungsmodul E_{v2} .

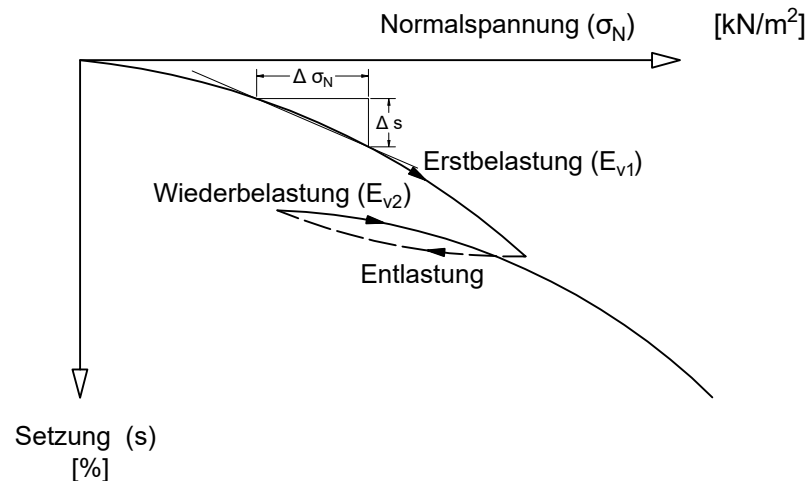


Abbildung 2.5: Druck-Setzungs-Kurve

Diese Parameter sind keine Materialkonstanten, sondern abhängig von den wirkenden Spannungen und der Lagerungsdichte.

Der Verformungsmodul E_v wird in einem Feldversuch mit dem statischen Plattendruckversuch ermittelt. Er wird auch Verformungswiderstand genannt. Mit Hilfe eines festen Widerlagers und einer Druckvorrichtung wird dieser Wert im Feld ermittelt. Die Formel für den Verformungsmodul ergibt sich zu:

$$E_v = 0,75 \cdot d \cdot \frac{\Delta \sigma_N}{\Delta s} \quad (2.12)$$

Dabei ist 0,75 der Formfaktor für die Spannungsverteilung unter der Lastplatte und d der Durchmesser der Lastplatte. Mit dem Formfaktor wird die Theorie der Spannungsausbreitung im elastischen Halbraum berücksichtigt. Die seitliche Ausdehnung des Bodens ist nur behindert, jedoch ist eine teilweise Ausdehnung möglich (vergleiche Abb. 2.6).

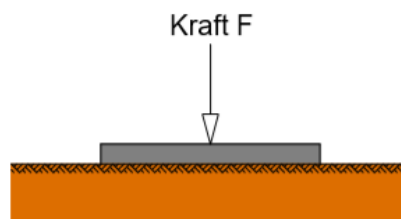


Abbildung 2.6: Seitliche Ausdehnung des Bodens behindert (teilweise Ausdehnung ist möglich)

2.8 Einflüsse auf die Bodensteifigkeit

Anhand bodenphysikalischer Kennwerte und der Bodenklassifikationen kann die Steifigkeit des Bodens aus den nachfolgenden Abbildungen abgeschätzt werden. Die Werte können zu den aufwendigen Messverfahren als Anhalts- und Richtwerte herangezogen werden. Wegen der unzureichenden Genauigkeit ist dies jedoch für praktische Anwendung nur begrenzt geeignet.

In Abbildung 2.7 wird der Einfluss der Trockendichte und des Wassergehaltes auf den Verformungsmodul (E_{v1}) dargestellt. Dieser Zusammenhang gilt vorwiegend für grob- und gemischtkörnige Böden und

wurde von Scholander (1973) aufgestellt. Es ist ersichtlich wie E_{v1} leicht progressiv mit der Trockendichte zunimmt und mit einem höheren Wassergehalt abnimmt. [4]

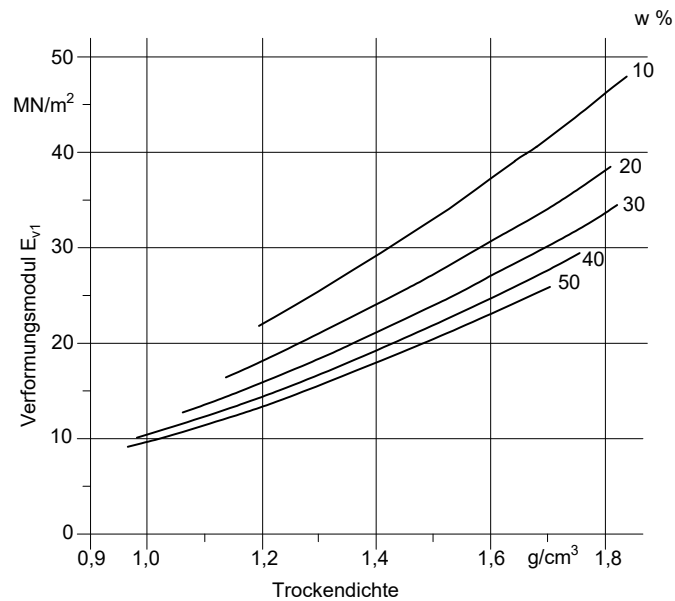


Abbildung 2.7: Einfluss von Trockendichte und Wassergehalt auf den Verformungsmodul E_{v1} (Abbildung nach [4])

In Abbildung 2.8 wird die Korrelation zwischen den Verformungsmodul (E_{v2}) und der Trockendichte für spezifische Bodenarten gezeigt. Erkannt wurde dieser Zusammenhang von Voss (1961) durch umfangreiche Versuche an Böden. Grundsätzlich kann eine Zunahme von E_{v2} mit steigender Trockendichte abgelesen werden. Die Beziehungen in den beiden Abbildungen 2.7 und 2.8 sind nur für künstlich verdichtete Böden gültig. [4]

Ergänzend wird angemerkt, dass die Steifigkeit von natürlich gelagerten Böden kein konstanter Wert ist. Abhängig von der wirksamen Spannung, Wassergehalt und den Jahreszeiten kann er variieren. [6];

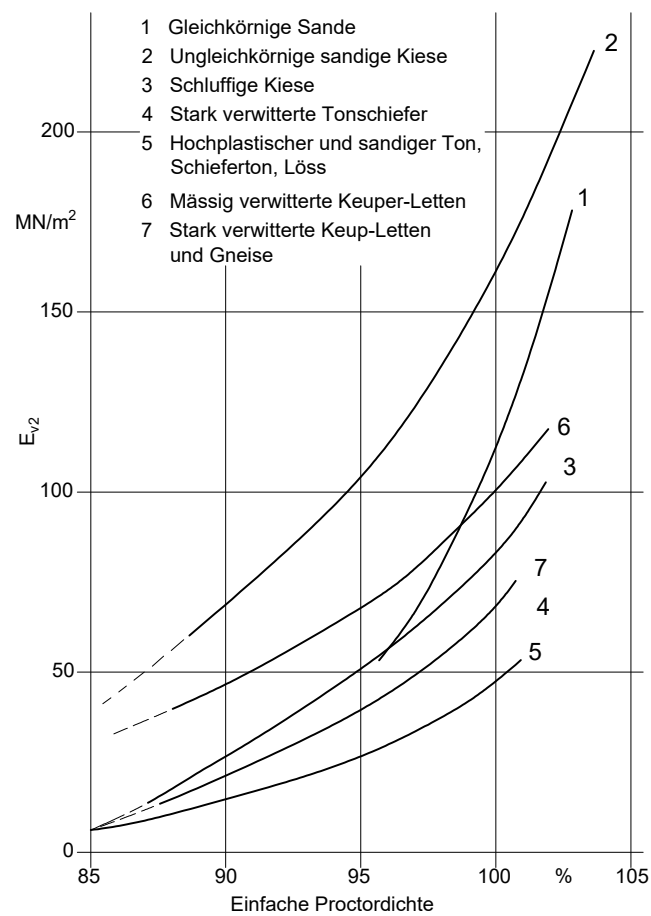


Abbildung 2.8: Beziehung zwischen Proctordichte und Verformungsmodul E_{v2} für verschiedene Bodenarten (Abbildung nach [4])

3 Methoden

3.1 Vorbemerkung

Die nachfolgenden Beschreibungen der Labor- und Feldversuche erfolgen nur stichpunktartig, es handelt sich dabei nicht um eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung und Auswertungen. Ergänzend wird auf die gültigen Normen und auf Fachliteratur verwiesen. Für die Untersuchungen im Labor gilt, dass sie grundsätzlich nach den gültigen technischen Normen für Österreich durchgeführt wurden. Die Feldmessungen sind ein erster wissenschaftlicher Ansatz zum Erfassen der Verdichtungsgrade von MTB-Strecken im Feld, mit Hilfe einer dynamischen Lastplatte.

3.2 Benennung, Beschreibung und Klassifizierung

Die Aufgabe der Klassifikation ist es, Böden in definierte Bodenarten zusammenzufassen. Dieses Vorgehen ermöglicht empirische Aussagen über das bodenmechanische Verhalten. Darüber hinaus können Erfahrungs- oder Vergleichswerte und Eigenschaften ähnlicher Bodenarten abgeleitet werden. [5, 2]

Die Einteilung in definierte Bodenarten ist kein streng objektives Verfahren. Die Einteilung in Gruppen wird unabhängig von den bodenphysikalischen Eigenschaften (Lagerungsdichte, Wassergehalt, ecc.) durchgeführt. Diese können jedoch zur weiteren Beschreibung hilfreich sein und zusätzliche Information liefern. [4]

Die Grundlagen zur Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden sind für Österreich in der ÖNORM B4400 geregelt. Die Tabelle 3.1 stellt einen Ausschnitt aus der ÖNORM B4400 zur Bodenklassifikation für gemischt körnige Böden dar. Diese Norm beschreibt Kriterien und Vorgehensweisen, welche das Bestimmungsverfahren der Bodenarten erleichtert. Folgende Merkmale sind maßgeblich für die Klassifikation:

- a) Korngrößenbereiche
- b) Korngrößenverteilung
- c) plastische Eigenschaften
- d) organischer Bestandteile

	1	2	3	4		5	6	7
	Hauptgruppen	Masse- anteile der Korn- größe in %		Gruppen		Kurzeichen Gruppensymbol ^a	Erkennungsmerkmale	Beispiele
		≤ 0,06 mm	> 2 mm					
9	Gemischtkörnige Böden	5 bis 40	> 40	Kies-Schluff- Gemische	5 bis 15 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	si' Gr	Lehmiger Hang- schutt, Seiten- und Endmoräne, Mu- renschutt, Grund- moräne, Pech- schotter ^a , Flinz ² , Mylonite
10					15 bis 40 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	si Gr, Si/Gr	
11				Kies-Ton- Gemische	5 bis 15 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	cl' Gr	Grundmoräne
12					15 bis 40 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	cl Gr, Cl/Gr	
13			≤ 40	Sand-Schluff- Gemische	5 bis 15 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	si' Sa	Aulehm, Gehänge- lehm, Grundmorä- ne, Bänderschuffe, Flinz ²
14					15 bis 40 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	si Sa, Si/Sa	
15				Sand-Ton- Gemische	5 bis 15 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	cl' Sa	Gehängelehm, Grundmoräne, Flinz ²
16					15 bis 40 Masse- anteile in %	≤ 0,063 mm	cl Sa, Cl/Sa	

Tabelle 3.1: Ausschnitt aus Tabelle A1 Bodenklassifikation: Gruppeneinteilung für gemischt körnige Böden laut ÖNORM B4400

3.2.1 Korngrößenbereiche

Der Boden besteht aus einem Gemisch von Kornpartikel mit unterschiedlicher Korngröße. Die Verteilung der Korndurchmesser kann aus einer Körnungslinie (siehe Abb. 3.2) entnommen werden. Der prozentuale Anteil der einzelnen Partikeldurchmesser zu der Gesamtmasse ist das wichtigste Unterscheidungskriterium für die Benennung der Bodenart. [3] Der Korndurchmesser eines Einzelkorn kann aus drei unterschiedlichen Durchmessern charakterisiert werden (siehe Abb. 3.1). Der maßgebende Durchmesser ist durch die Maschenweite des Siebes definiert, durch welches das Einzelkorn als letztes gefallen ist.

Bodengruppe	Korngrößenbereich [mm]	
großer Block	> 630	
Block	> 200	$a \leq b$ 630
Stein	> 63	$a \leq b$ 200
Kies	> 2	$a \leq b$ 63
Sand	> 0,063	$a \leq b$ 2
Schluff	> 0,002	$a \leq b$ 0,0063
Feinstkorn und Ton		$a \leq b$ 0,002

Tabelle 3.2: Korngrößenbereiche laut ÖNORM B4400

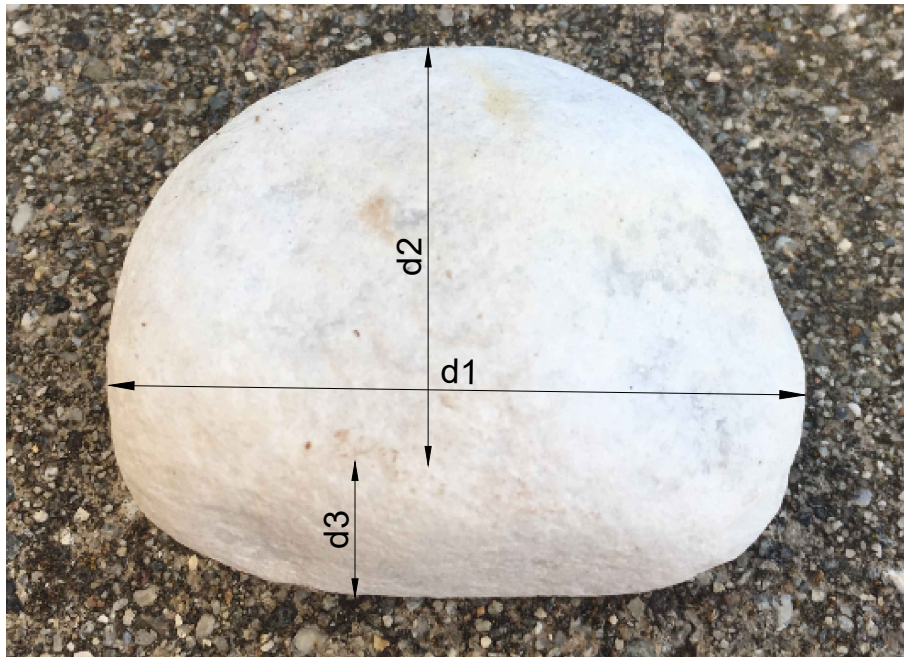


Abbildung 3.1: Charakteristischer Durchmesser zur Korngrößenbestimmung

3.2.2 Bodenansprache in Situ

Um eine Einschätzung der vorliegenden Bodenart vor Ort zu bekommen eignet sich eine Bodenansprache in Situ. Die Einteilung in den Hauptbodengruppen wird nach den folgenden Kriterien getroffen.

Kieskornbereich: kleiner als Hühnereier, größer als Streichholzköpfe.

Sandkornbereich: kleiner als Streichholzköpfe bis zur Grenze des noch mit dem bloßen Auge erkennbaren Kornes.

Schluffkorn und *Tonkorn* kann nicht mit dem bloßen Auge erkannt werden.

Ein tonhaltiger Boden fühlt sich seifig an und bleibt an den Fingern kleben. Im trocken Zustand kann er nur durch Abwaschen von den Fingern gelöst werden. Schluffige Böden fühlen sich hingegen weich und mehlig an. Im trocken Zustand lassen sich die Partikel einfach von den Fingern fortblasen.

Mit dem Reibversuch kann der Anteil an Sand, Schluff und Ton abgeschätzt werden. Eine kleine Probe wird zwischen den Finger zerrieben, eventuell unter Wasser. Der Sandkornanteil kann an seiner Rauheit erkannt werden, es knirscht und kratzt. Alternativ kann eine durchfeuchtete Bodenprobe mit einem Messer zerteilt werden. Ist die Schnittfläche glänzend, weist dies auf Ton hin. Ist die Oberfläche jedoch stumpf, so ist dies ein Zeichen für Schluff. [3, 4]

3.2.3 Korngrößenverteilung

Die Klassifikation in Bodenarten erfolgt maßgeblich anhand von Kornverteilungslinien $y_{(d)}$. Durch die sogenannte Kornverteilungskurven (Kornlinien) wird die Zusammensetzung eines Bodens in Massenanteile (y) je definiertem Partikeldurchmesser (d) aufgeschlüsselt. Die Abbildung 3.2 zeigt Kornverteilungslinien für typische Bodenarten.

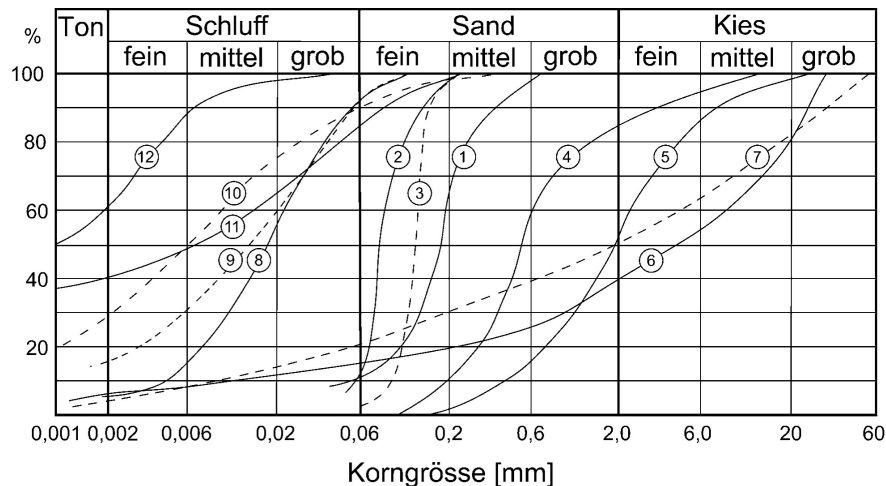


Abbildung 3.2: Beispiele für Körnungslinien typischer Bodenarten (1) Fein-/Mittelsand (2) Feinsand (3) Flugsand (4) Flusssand, nass gebaggert (5) Kiessand (6) Hochterrassenkiese (7) Verwitterungslehm, steinig-sandig (ähnlich auch Geschiebelehm) (8) Löß (9) Lößlehm (10) Lehm, tonig (Schluff, stark tonig, leicht feinsandig) (11) Ton, stark schluffig (12) Ton, schluffig [7]

Von der Korngrößenverteilung sind mehrere wichtige Bodeneigenschaften abhängig, besonders die Festigkeit und Verformbarkeit, sowie die Frostempfindlichkeit. Der Vergleich mit Sieblinien von Böden deren Eigenschaften bekannt sind kann nützliche Informationen liefern. [4] Gemäß ÖNORM B4412 werden die Maschenweiten der Siebe laut Tabelle 3.3 definiert. Das Ergebnis der Korngrößenverteilung wird als Summenlinie der Siebrückstände pro Siebdurchgang zusammengefasst. [5] Die Massenanteile der Korngrößen über 0,063 mm werden durch Trockensiebung, die Anteile der Korngrößen unter 0,125 mm werden durch Sedimentation ermittelt. Sind in den Bodenproben hohe Anteile (d.h. >5 %) an Feinkorn zu vorhanden, muss eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse durchgeführt werden. [2, 5] Die Kornverteilungslinien werden in einem Diagramm mit einem logarithmischen Maßstab aufgetragen. Dies verdeutlicht den Anteil der kleinen Kornfraktionen, die die Eigenschaften eines Bodens maßgeblich mitbestimmen (siehe Abb. 3.2).

Maschenweiten
63 mm
31.5 mm
16 mm
8 mm
4 mm
2 mm
1 mm
0.5 mm
0.25 mm
0.125 mm
0.063 mm

Tabelle 3.3: Maschenweite der Siebe laut ÖNORM B 4412

3.2.4 Beschreibung und Darstellung der Kornfraktionen

Die Beschreibung des Verlaufes der Kornverteilungslinie liefern zusätzliche Informationen und wird der Bodenart-Bezeichnung angehängt. Gemäß der Vorschrift B4400 werden folgende Beschreibungen verwendet:

- a) weitgestufte ("W") oder flach verlaufenden Korngrößenverteilungen
- b) gut gestufte ("G") oder mäßig steil verlaufende Korngrößenverteilungen
- c) enggestufte ("E") oder steil verlaufenden Korngrößenverteilungen
- d) intermittierend ("I") gestufte oder stufenförmige verlaufende Korngrößenverteilung

Zur Beschreibung der Kurvenverläufe werden zwei Kenngrößen C_U und C_C eingeführt. Die Ungleichförmigkeitszahl C_U ist das Maß für die Steilheit der Körnungslinie im Bereich von d_{10} bis d_{60} . Die Ungleichförmigkeitszahl C_U ist definiert als

$$C_U = d_{60}/d_{10} \quad . \quad (3.1)$$

Die Krümmungszahl C_C beschreibt auf den Verlauf der Körnungslinie im Bereich von d_{10} bis d_{60} :

$$C_C = d_{30}^2/d_{60} \cdot d_{10} \quad . \quad (3.2)$$

Die Kürzel d_{10} , d_{30} und d_{60} sind die Korngrößen (bzw. Größe der Maschenweiten des Siebes) welche 10%, 30% und 60% der Massenanteile der Gesamtmenge entsprechen.

3.2.5 Plastische und organische Bestandteile

Zur Unterscheidung der beiden Bodenarten Schluff und Ton dient die Analyse der plastische Eigenschaften. Die plastischen Bereiche der beiden Bodenarten werden durch die Atterberg'schen Grenzen bestimmt. Diese Zustände werden in breiig, sehr weich, weich und steif eingeteilt.[3] [5] In dieser Arbeit wird diese Analyse des Feinkornes nur anhand von Sedimentation (siehe Abb. 3.3) durchgeführt. Deshalb wird nicht weiter auf diese Unterscheidung und die entsprechenden Methoden eingegangen.

Das organische Material besteht aus pflanzlich und tierischen Rückständen. Diese Bestandteile können unterschiedliche Zersetzungsgrade vorweisen. Bestimmt wird der Anteil des organischen Materials

im Glühofen (siehe Abb. 3.6). Der Gehalt an organischem Material wird am Ende der Bezeichnung einer Bodenart angeführt. In der Tabelle 3.4 sind die Kürzel für die unterschiedlichen organischen Gehalte aufgelistet. MTB-Strecken verlaufen meistens durch Wald- und Weidegebiete. Das anfallende organische Material setzt sich also hauptsächlich aus Baumzapfen, Baumnadel und Wurzelrückständen zusammen.

Boden	Organischer Anteil in % der Trockenmasse	Kurzzeichen
schwach organisch	2 bis 6	or'
mittel organisch	> 6 bis 20	or
stark organisch	> 20	$\overline{or}$

Tabelle 3.4: Bezeichnungen für organische Massenanteile laut ÖNORM B4400

3.3 Sieb- und Schlämmanalyse

Durch eine Serie von Sieben (siehe Abb. 3.3) mit verschiedenen Maschenweiten, wird eine Bodenprobe in unterschiedliche Kornklassen mit abnehmenden Größen getrennt. Für Proben mit einem hohen Anteil an Körnern ($\varnothing \leq 0,125$ mm), besteht das Verfahren aus einer Kombination von Waschung und Trockensiebung. Die Massenanteile verschiedener Korndurchmesser werden in einer Kornverteilungskurve (siehe Abb. 3.2) dargestellt. Die Durchführung des Versuches zur Bestimmung der Korngrößenverteilung ist in der ÖNORM EN 933-1 geregelt. Für diese Prüfung sind nur Korngrößen bis zu einem Durchmesser von 90 mm zugelassen.



Abbildung 3.3: Siebturm

3.3.1 Aufbau des Versuches

Für die Durchführung der kombinierten Sieb- und Schlämmanalyse wird ein Sieb- und Waschturm benötigt. Darüber hinaus sind für die Trockensiebung eine Waage, eine Schale und eine Bürste notwendig. Zur Bestimmung der Korngrößen des Feinkornanteils werden ein Aräometer, Messzylinder, Thermometer, Stoppuhr und ein Dispergierungsmittel benötigt.

3.3.2 Durchführung des Versuches

Die trockene Bodenprobe wird portionsweise in den Waschturm eingefüllt. Durch Rütteln unter Zugabe von Wasser werden, mit einer Reihe von Sieben (kleinste Maschenweite 0,125 mm) die Feinanteile abgetrennt. Die entstandene Suspension wird in einem Eimer aufgefangen. Das restliche Material wird im Trockenofen für mindestens 24 h bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und bildet das Ausgangsmaterial für die Trockensiebung. Das trockene Material wird in den Siebturm eingefüllt und für 20 Minuten gerüttelt. Die Massenrückstände pro Sieb werden gewogen und notiert.

Die Bestimmung der Kornverteilung der Feinanteile wird anhand einer Sedimentationsanalyse durchgeführt. Diese Methode beruht auf dem Prinzip, dass in einer Flüssigkeit größerer Körner schneller absinken als kleinere. Es werden 20 bis 50 g des Bodens mit destilliertem Wasser vermischt und in einem Standzylinder (siehe Abb. 3.4) eingefüllt. Ein Dispersionsmittel wird dieser Suspension zugegeben, damit die einzelnen Körner nicht zusammenheften. Mit Hilfe eines Aräometers wird zu vorgegeben Zeiten (siehe Norm oder Protokoll der Laborversuchen Anhang A) der Schwerpunkt der Suspension aufgemessen. Aus den unterschiedlichen Absinkzeiten und den Absinktiefen des Aräometers kann über das Gesetz von Stokes einheitliche Korndurchmesser d von Kugeln gleicher Dichte errechnet werden. [5]

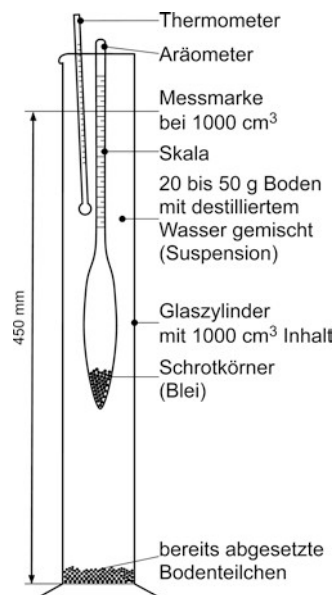


Abbildung 3.4: Messzylinder für Sedimentationsanalyse [7]

3.3.3 Auswertung des Versuches

Die einzelnen Massen der Siebrückstände je Sieb (siehe Laborprotokoll Anhang A) sind zu wiegen und als prozentualer Anteil der Anfangstrockenmasse anzugeben (siehe Formel 3.3). Der Anteil der Feinanteile wird addiert. Die Summe der gesamten Rückstände der Siebe und das Feinkorn müssen zusammen 100 % des Ausgangsmaterial ergeben. Diese werden grafisch in Form einer Kornverteilungslinie dargestellt. Ein Massenverlust von mehr als 1 % des Materiales ist bei der Versuchsdurchführung laut Norm unzulässig. Die Gewichtsanteile der einzelnen Siebdurchgänge berechnen sich wie folgt:

$$y_{(d)} = \frac{m_d \text{ Siebrückstand}}{m_{\text{Gesamt}}} \quad (3.3)$$

Die Auswertung der Sedimentationsanalyse erfolgt über das Gesetz von Stokes (siehe Formel 3.4). Durch die Ablesungen der Absinktiefe h_g am Aräometer und den Absinkzeiten t , kann über die Sinkgeschwindigkeit v (Formel 3.5) auf die vertikale Dichteveränderung der Suspension geschlossen werden. Aus der Veränderung der Dichte der Suspension lässt sich nach dem Gesetz von Stokes ein gleichwertiger Korndurchmesser d von Kugeln gleicher Dichte errechnen, die beim Sedimentieren mit der gleichen Geschwindigkeit zum Boden sinken würde. Dadurch kann die Kornverteilung der Feinkörner anhand von einheitlichen Korndurchmessern abgeschätzt werden. Die weiteren Faktoren in der Gleichung sind: μ ein Wert für die dynamische Zähigkeit der Suspension, g ist die Erdbeschleunigung, ρ_s die Korndichte und ρ_w die Dichte des Wasser. [5, 8]

Für die untersuchten Bodenprobe erfolgte die Auswertung der Schlämm- und Siebanalyse mit der GGU-Software.

$$d = \sqrt{\frac{18\mu}{(\rho_s - \rho_w)g}} \quad (3.4)$$

$$v = h_g/t \quad (3.5)$$

3.4 Proctor Versuch

Dieser standardisierte Laborversuch ist ein Verfahren, bei dem die Bodenprobe mit festgelegter Verdichtungsarbeit durch Stampfen verdichtet wird (siehe Abb. 3.5). Er dient zur Herstellung einer Beziehung zwischen der maximal erreichbaren Trockendichte und dem beim Einbau verwendeten Wassergehalt. Bei vorgegebener Verdichtungsarbeit hängt die erreichbare Trockendichte vom Wassergehalt ab. Das Wasser setzt die Reibung zwischen den Bodenteilchen herab und so können diese eine hohlraumarme Lagerung einnehmen. [9] Werden die erzielten Trockendichten in Abhängigkeit von den jeweiligen Wassergehalten dargestellt, so ergibt sich für den Boden eine charakteristische Verdichtungskurve mit parabelähnlicher Form (siehe Abb. 3.7). [10] Wird der Wassergehalt über das Optimum weiter gesteigert, nimmt die Trockendichte ab, da das Wasservolumen eine dichtere Lagerung verhindert.

Der Einfluss des Wassergehaltes ist besonders bei der Verdichtung von feinkörnigen Böden bemerkbar. Für die Verdichtung von grobkörnigen Böden ist der Wassergehalt von untergeordneter Bedeutung. [9] Die maximale Proctordichte kann auch als Referenzwert zur Überprüfung der Verdichtung im Feld herangezogen werden. Die Durchführung des Proctorversuches ist für Österreich in der ÖNORM B 4418 geregelt.



Abbildung 3.5: Automatischer Proctorhammer

Die Abbildung 3.6 stellt Proctorkurven für unterschiedliche Bodenarten dar. Auf der Ordinate sind die Trockendichten und auf den Abszisse ist der Wassergehalt aufgetragen. Die Proctorkurven werden durch die Sättigungslinie begrenzt.

In Abhängigkeit der zugeführten Verdichtungsarbeit kann die einfache oder modifizierte Proctordichte bestimmt werden. Die Verdichtungsarbeit bei der einfachen Proctordichte beträgt $A_1 = 0,6 \text{ MN/m}^3$ und bei der modifizierten Proctordichte $A_2 = 2,7 \text{ MN/m}^3$. Die aufgebrachte Verdichtungsarbeit hat sowohl Einfluss auf die optimale Trockendichte als auch auf den optimalen Wassergehalt. [2] Die aufgebrachte Arbeit beim Standard Proctorversuch entspricht in etwa der Verdichtungsarbeit von Verdichtungsgeräten im Feld. Der modifizierte Proctorversuch dient zur Simulation schwererer Verdichtungsgeräten. [3]

Bei höherer Verdichtungsarbeit liegt die erzielbare maximale Trockendichte über und der optimale Wassergehalt unter den Ergebnissen aus dem Standard Proctorversuch. Die Verdichtungskurve (siehe Abb. 3.7) wird von den Grenzwassergehalten umschlossen. Nur unterhalb des optimalen Wassergehaltes ("Trockener Ast der Proctorkurve") kann durch Steigerung der Verdichtungsarbeit eine merkliche Erhöhung der im Proctorversuch ermittelten Proctordichte erzielt werden. Eine Steigerung der Dichte oberhalb des optimalen Wassergehalt ("Nasser Ast der Proctorkurve") ist nur eingeschränkt möglich, da die Verdichtbarkeit bei gleichem Wassergehalt durch die Sättigungslinie begrenzt wird (vergleiche Abb. 3.7). Die Sättigungslinie beschreibt den Verlauf der Kurve des Porenwasservolumen bezogen auf das Gesamtporenvolumen bei vollständiger Sättigung. Bei einem Sättigungsgrad von 100 % sind die Hohlräume vollständig mit Wasser gefüllt.

3.4.1 Aufbau des Versuches

Zur Durchführung des Standard Proctorversuch kommt ein Fallgewicht von 4,5 kg zum Einsatz. Die Fallhöhe des Hammers beträgt 45 cm. Der Versuchszylinder, in welchen die Probe eingebaut wird, besteht aus einem zweiteiligen Aufsatzring und einer abnehmbaren Grundplatte. Der Zylinder hat einen Innendurchmesser von 14,9 cm und eine Höhe von 12,5 cm. Außerdem werden zur Versuchsdurchführung eine Waage, Spachtel, Messlehre, Stahllineal und ein Hammer benötigt. [2]

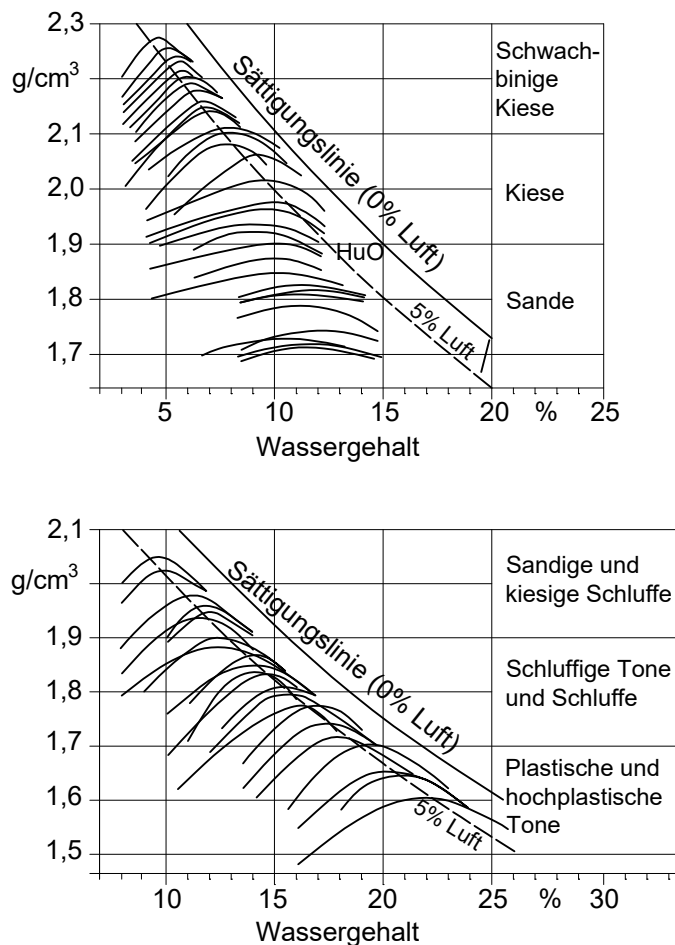


Abbildung 3.6: Proctorkurven für verschiedene Bodenarten mit zugehöriger Sättigungslinie (Abbildung in Anlehnung an [4])

3.4.2 Durchführung des Versuches

Die trockene Bodenprobe wird in drei gleich hohen Lagen in den Versuchszylinder eingebaut. Jede Lage wird mit dem Proctorhammer 22 Mal gestampft. Nach dem Verdichten wird der Zylinder mit einem Stahllineal zu einer geraden Fläche abgezogen. Anschließend wird der Versuchszylinder mitsamt dem Boden gewogen. Durch das bekannte Volumen V und Masse des Zylinder, kann die Masse der Bodenprobe m ermittelt werden.

Die Probe wird mit einem um 2-3 % erhöhten Wassergehalt sorgfältig durchmischt und wieder in den Zylinder eingebaut. Wird mit einer trocknen Bodenprobe begonnen, kann die erste Wasserzugabe auch 4-5 % der Masse betragen. Ein Teilprobe des Gemisches wird bei jedem Durchgang zur exakten Wassergehaltsbestimmung entnommen. Der Einzelversuch ist so oft zu wiederholen, bis das Maximum der Dichte für die eingebaute Bodenprobe erreicht ist. Für die Beschreibung der Proctorkurve, werden idealerweise mindestens zwei Punkte vor und zwei Punkte nach dem Maximum der Dichte bestimmt.

3.4.3 Auswertung des Versuches

Zur Auswertung des Versuches werden die nachfolgenden Formeln verwendet. Einige der Formel, bzw. die Notationen sind bereits im Abschnitt 2.3 definiert. Die Dichte ρ ergibt sich aus dem Verhältnis der

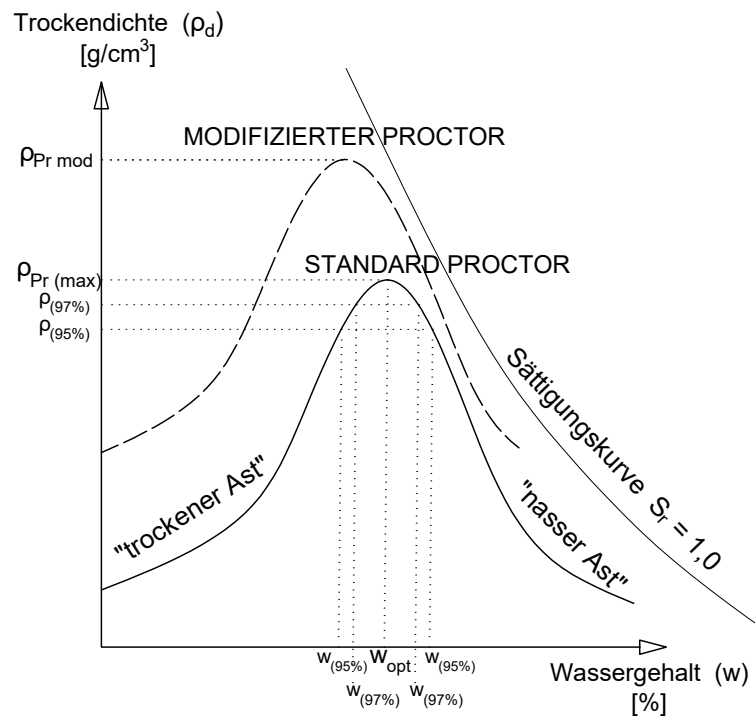


Abbildung 3.7: Verdichtungskurven des Proctorversuches

Masse m zum bekannten Volumen V des Zylinders. Bei Kenntnis des Wassergehaltes w kann die Trockendichte ρ_d aus der Dichte ρ bestimmt werden.

$$\rho = m/V \quad (3.6)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100}} \quad (3.7)$$

3.5 Kompressionsversuch

Der Kompressionsversuch ist ein Druckversuch bei verhinderter Seitendehnung, wobei die Probe einem eindimensionalem Verzerrungszustand ausgesetzt ist (siehe Abb. 3.8). Dieser Versuch dient zur Beschreibung des Setzungs- und Verformungsverhaltens des Bodens. Im Unterschied zum statischen Lastplattenversuch (vergleiche Abb. 2.6) wird die Bodenprobe in einen festen Versuchsring eingebaut und deshalb ist die seitliche Ausdehnung des Bodenkörpers verhindert (vergleiche Abb. 3.8). Die Durchführung und Auswertung ist in der ÖNORM EN ISO 17892-5 geregelt.

3.5.1 Aufbau des Versuches

Das Kompressionsgerät besteht aus einem Belastungsrahmen, welcher das Aufbringen von zentrischen Vertikalspannungen ermöglicht. Die stufenweise Belastung der Probe erfolgt entweder durch das Aufbringen von Gewichten (siehe Abb. 3.9) oder durch mechanische, pneumatische oder hydraulische Mittel. Die Bodenprobe wird in einem festen Ring, zwischen zwei Filterplatten eingebaut. Dieser feste Ring unterbindet die seitliche Ausdehnung der Bodenprobe. Ein Verformungsmesser und eine Stoppuhr werden zur Aufnahme der vertikalen Verformungen benötigt. Darüber hinaus wird eine Waage und das nötige Werkzeug zum Herstellen des Probekörpers benötigt.

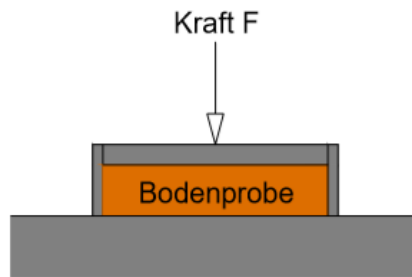


Abbildung 3.8: Seitliche Ausdehnung des Bodens ist verhindert



Abbildung 3.9: Ödometer mit eingespannter Probe

3.5.2 Durchführung des Versuches

Der Kompressionsversuch wird mit stufenweiser Laststeigerung durchgeführt, die Belastung wird dabei jeweils verdoppelt (z.B. Aufbringen von Gewichten). Die Belastungsdauer der Laststufen beträgt üblicherweise 24 h. Eine Belastung muss jedoch bis zum Abklingen der Verformungen aufrecht erhalten bleiben. Abhängig von der Bodenart kann dies kürzer oder länger als 24 h sein. Die durch die aufgeprägte Kraft (bzw. Spannung) hervorgerufenen Verschiebungen werden zu vorgegebenen Zeiten aufgezeichnet (siehe Anhang A oder Norm). Das Ergebnis wird in einer Druck-Setzungs-Kurve (siehe Abb. 2.5) dargestellt.

3.5.3 Auswertung des Versuches

Der Verformungsmodul für Versuche bei behinderter Seitenspannung wird Steifemodul genannt. [8] Er gibt das Verhältnis der Normalspannung σ_N zur Dehnung ε an. Die Dehnungen ergeben sich aus den bezogenen Setzung h/h_0 bei behinderter Seitendehnung. Der Wert lässt sich als Sekanten- oder Tangentenmodul ermitteln. Vielfach wird er als Sekantenmodul (Anfangs- und Endwert) für die einzelnen Laststufen ermittelt. [7]

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_N}{\Delta\varepsilon} \quad (3.8)$$

3.6 Glühverlust

Der Glühverlust gibt den Massenverlust von organischen Substanzen eines Bodens beim Glühen bezogen auf seine Trockenmasse an. [2] Für Österreich ist dieser Versuch in der ÖNORM B 4424 geregelt.

3.6.1 Durchführung des Versuches

Für den Versuch wird eine Bodenprobe bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Durch wiederholtes Glühen bei $(600 \pm 30) ^\circ\text{C}$ im Glühofen, wird der organische Anteil bestimmt. Die im Boden enthaltenen organischen Anteile verbrennen im Gegensatz zu den mineralischen Bestandteilen. Der Massenverlust der Probe kann jedoch nicht nur auf die Oxidation von organischen Kohlenstoff zurückgeführt werden. Bei Glühen können eine Reihe von physikalischen und chemischen Prozessen ablaufen, z.B. wird beim Glühen gebundenes Wasser aus den Mineralien freigesetzt. Deshalb muss die Bodenprobe doppelt verglüht werden. Vor dem wiederholten Glühen wird die Probe zerkleinert, für 24 h mit destillierten Wasser versetzt und erneut getrocknet.



Abbildung 3.10: Glühofen

3.6.2 Auswertung des Versuches

Der Anteil des Glühverlustes C_{gl} ergibt sich aus der Differenz der Probenmasse m_{gl} nach dem Glühen bezogen auf die Trockenmasse der Probe vor dem Glühen m_d . Der Glühverlust wird in Prozent angegeben.

$$C_{gl} = \frac{\Delta m_{gl}}{m_d} \cdot 100 \quad (3.9)$$

Der organische Anteil C_{org} ist definiert als Differenz des Glühverlustes der ersten Glühung C_{gl1} und des Glühverlustes der zweiten Glühung C_{gl2} .

$$C_{org} = C_{gl1} - C_{gl2} \quad (3.10)$$

3.7 Dynamischer Lastplattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (dLFG)

Diese Methode eignet sich zum Prüfen der Tragfähigkeit und zur Beurteilung der Verdichtungsqualität von Böden. Hauptsächlich wird dieser Versuch im Erd- und Verkehrswegebau eingesetzt. Der Lastplattenversuch mit dem leichten Fallgewicht, wird als Alternative und Ergänzung zum aufwendigen statischen Plattendruckversuch verwendet. Eine hohe Anzahl an Prüfungen kann in kurzer Zeit bei relativ geringem Gesamtaufwand durchgeführt werden. Das Gerät eignet sich laut Hersteller für eine Vielfalt an Böden, insbesondere für grobkörnige und gemischtkörnige Böden und ist auf ein Größtkorn von 63 mm beschränkt. [11] Die Prüfvorschrift für den Verdichtungsnachweis mittels dynamischem leichten Fallgewicht wird für Österreich in der RVS 08.03.04 geregelt. Dieses Prüfverfahren eignet sich in beengten Bereichen. Es können dabei Schichtdicken bis ungefähr 25 cm geprüft werden. Die Prüfungen liefern in der Regel größere Streuungen als ein statischer Lastplattenversuch.

3.7.1 Aufbau des Versuches

Das dynamische LFG setzt sich aus drei Hauptkomponenten zusammen (siehe Abb. 3.11).

Die Lastplatte ist eine 15 kg schwere Stahlplatte mit einem Durchmesser von 30 cm. Diese Platte ist mit einem Beschleunigungssensor zur Aufnahme der Stöße ausgestattet. An der oberen Seite befindet sich der zylinderförmiger Lastkopf mit einer Zentrierkugel zur kraftschlüssigen Übertragung der Stoßkraft.

Die Führungsstange mit dem Federbalg und Fallgewicht wird auf dem Lastkopf aufgesetzt. Diese Führungsstange hat eine Länge von 114 cm und wiegt 5 kg. Sie verfügt über eine Dosenlibelle zum horizontalen Ausrichten und eine Ausklinkvorrichtung zum Fixieren und Loslassen des Fallgewichtes. Das Fallgewicht kann sich entlang der Führungsstange bewegen und schlägt auf dem Federbalg auf. Das Fallgewicht ist 10 kg schwer.

Der Messcomputer ist mit dem Sensor an der Lastplatte über ein Kabel verbunden. Er registriert und berechnet den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} in Echtzeit. Dem Benutzer des Prüfgerätes werden Anweisungen zur Versuchsdurchführung über eine Sprachausgabe gegeben.

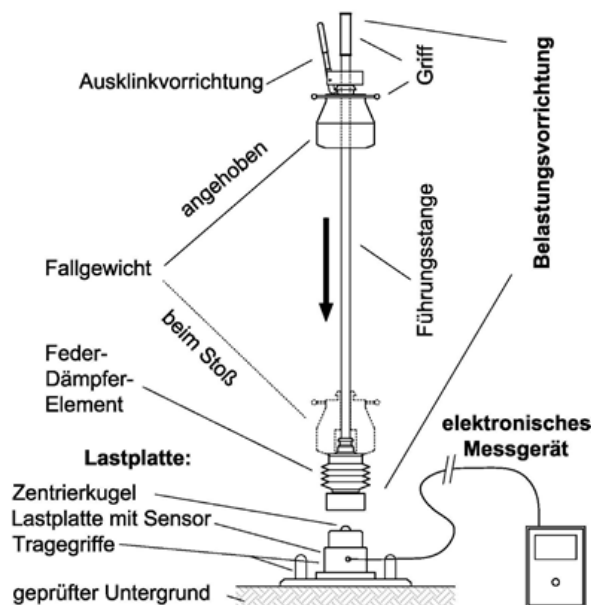


Abbildung 3.11: Prinzipskizze des dynamischen LFG [12]

Zusätzlich wurde für den Transport der Lastplatte eine Sackroller eingesetzt. Die Messpunkte (in regelmäßigen Intervallen) wurden mit einem Messrad ermittelt und fortlaufen dokumentiert. Das gesamte Equipment zur Messung ist in Abbildung 3.12 dargestellt.



Abbildung 3.12: Equipment bei den Feldmessungen: Messrad, dynamische Lastplatte mit leichtem Fallgewicht und Sackkarre mit Messcomputer

3.7.2 Durchführung des Versuches

Für eine korrekte Messung muss die Lastplatte vollflächig und kraftschlüssig auf dem Boden aufliegen. Gegebenenfalls muss die Aufliegefläche am Boden durch Hin- und Herschieben der Lastplatte geebnet werden. Größer Steine (≥ 63 mm) und lose Bodenteile sollten nach Möglichkeit entfernt werden. Die Führungsstange wird mit dem Fallgewicht auf die Lastplatte gestellt und der Messcomputer mit der Platte verbunden. Zum Herstellen des vollständigen Kontaktes zwischen Platte und Prüffläche, werden drei Vorbelastungsstöße durchgeführt. Auf diese folgen drei Messstöße, deren Maximalverformung und Beschleunigungszeit aufgezeichnet wird. Das Fallgewicht wird nach jedem Stoßvorgang vom Benutzer gefangen und mit Hilfe der Ausklinkvorrichtung am Ende der Führungsstange befestigt. Daraus ergeben sich für jeden Stoß dieselben Bedingungen. Nach Ende des Durchlaufes gibt der Messcomputer einen Wert für den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} aus oder fordert den Benutzer auf die Messung zu wiederholen. Der gesamte Aufwand für das Vorbereiten und das Messen beträgt weniger als 5 Minuten pro Prüfungspunkt.

3.7.3 Versuchsauswertung

Der integrierte Beschleunigungssensor in der Lastplatte misst bei dem Stoßvorgang den Impuls der Beschleunigung. Der elektronische Messcomputer berechnet den daraus hervorgerufenen Wert der Setzung. [11, 12]

Der Mittelwert der Plattenverschiebungen aus den drei Messstößen wird als Setzung $s_{\max}$ bezeichnet und bildet die Basis zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmodules. Für die Versuchsauswertung werden zwei vereinfachte Annahmen getroffen. Die erste Annahme ist, dass die Formel für den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} die Formel des statischen Lastplattenversuches (siehe 3.11) ist. Sie beruhen auf der Theorie des statisch belasteten elastischen Halbraumes. Dabei ist $\Delta\sigma$ die Änderung der mittleren Sohlpressung, und Δz die zugehörige Vertikalverschiebung der Platte. Daraus folgt, dass die geschwindigkeitsabhängigen Terme und Massenträgheitskräfte vernachlässigt werden.

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta z} \quad (3.11)$$

Die zweite Annahme ist, dass die maximal mittlere Bodenpressung $\sigma_{\max}$ unter der Lastplatte als konstant mit $0,1 \text{ MN/m}^2$ angenommen wird. Der Radius der Platte beträgt 15 cm . Daraus ergibt sich die Formel 3.12 für den dynamischen Verformungsmodul. In die Bestimmung des E_{vd} geht nur die $z_{\max}$ ein (siehe Abb. 3.13) [13]

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{\max}} [\text{MN/m}^2] \quad (3.12)$$

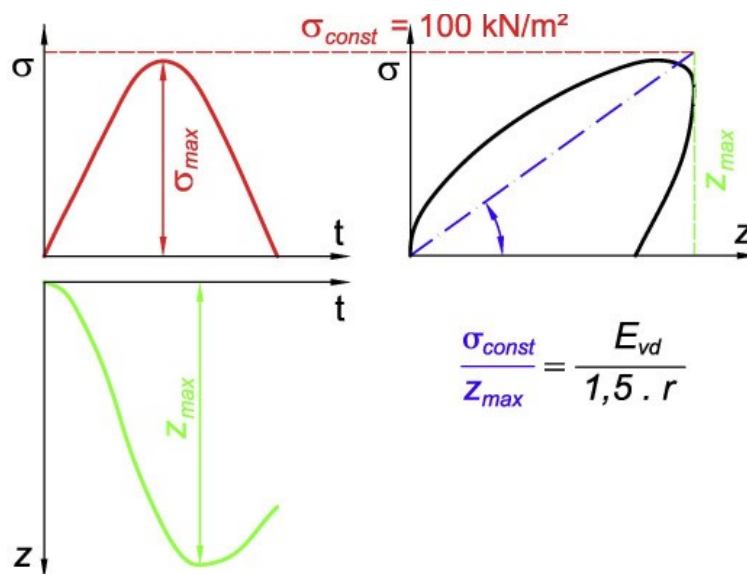


Abbildung 3.13: Bodenpressung, Verschiebung und Arbeitsdiagramm der dynamischen Lastplatte [13]

3.7.4 Korrelation von dynamischen und statischen Verformungsmoduln

Für Österreich werden laut RVS 08.03.04 zwei unterschiedliche Ansätze, für bindige und nichtbindige Böden angegeben. Diese Formeln dienen zur Umrechnung des Erstbelastungsmodul (E_{v1}) des statischen Lastplattenversuches in den dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}) des dynamischen Lastplattenversuches.

Für nicht bindige Böden gilt:

$$E_{v1} \geq 25 \text{ MN/m}^2 \text{ mit } E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} \cdot E_{v1} \quad (3.13)$$

$$E_{v1} \leq 25 \text{ MN/m}^2 \text{ mit } E_{vd} = \frac{6}{5} \cdot E_{v1} \quad (3.14)$$

und für bindige Böden gilt:

$$E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} \cdot E_{v1} \quad (3.15)$$

Mit diesen Formeln können die Anforderungen (Grenzwerte) an den Untergrund umgerechnet werden. Im Normalfall wird die dynamische Lastplatte als Vergleichsprüfung zum statischen Lastplattenversuch herangezogen. Daher sind die Formeln laut Richtlinie nur in eine Richtung gültig. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass diese Formeln auf empirischen Ansätzen beruhen.

In der gültigen Prüfvorschrift für Deutschland (ZTV-E-StB 09) wird als Umrechnungswert für den dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}), der Widerbelastungsmodul (E_{v2}) aus den statischen Lastplattenversuch herangezogen. Die Ansätze für die Umrechnungen werden weiters nach Materialien getrennt. Für nicht bindige Böden wird eine Korrelation von $E_{v2} = (2,0 - 2,3) E_{vd}$ von statischem auf dynamischem Verformungsmodul angegeben. Für feinkörnige Böden sind die Umrechnungsfaktoren kleiner als 2. [8] Dies hat zur Folge, dass sich in der Praxis ein Umrechnungsfaktor von 2 durchgesetzt hat. [14]

$$E_{v2} = 2 \cdot E_{vd} \quad (3.16)$$

In der Literatur sind noch weitere Umrechnungsansätze zu finden. Von Adam und Kopf wurden auf der Konferenz Messen in der Geotechnik (2002) an der TU Braunschweig der Ansatz (3.17) vorgestellt [14]. Vom Landesbetrieb Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW) wurde in einem Seminar (2006) der Ansatz (3.18) vorgeschlagen.

$$E_{vd} = 600 \cdot (1 - \exp(-E_{v2}/600)) \quad (3.17)$$

$$E_{v2} \approx (1,5 \cdot E_{vd} - 17,225)/0,3214 \quad (3.18)$$

Für den Vergleich des Steifemoduls aus den Kompressionsversuchen mit den Verformungsmodul aus der statischen Lastplatte, kann für Anwendungen angenommen werden, dass der Steifemodul größer gleich dem Verformungsmodul ist [15]. Im Kompressionsveruch ist die seitliche Ausdehnung des Bodens verhindert.

4 Durchführung, Auswertung und Interpretation der Labor Versuche

4.1 Vorbemerkung

Dieses Kapitel beinhaltet einen Teil der Hauptuntersuchungen dieser Arbeit. Diese Untersuchungen sind standardisierte Laborversuche und wurden nach Stand der Technik im Geotechniklabor der Universität Innsbruck durchgeführt.

Im ersten Abschnitt wird die Auswahl der Bodenproben beschrieben. Wesentliche Punkte dabei sind die Art der Entnahme, die Wahl der Standorte und die Klassifikations Ergebnisse laut gültigen Normen. Die Klassifikationen der Böden werden als fundamental betrachtet, da diese Aufschluss über die Zusammensetzung und die Kornverteilung geben. Die untersuchten Böden werden dadurch in Bodenarten eingeteilt und zusammengefasst. Dadurch können analytische Aussagen über das bodenmechanische Verhalten, Vergleichswerte und Eigenschaften von ähnlichen Böden abgeleitet werden.

Die Durchführung des Proctor Versuches dient dazu einen Zusammenhang zwischen der möglichen erzielbaren Trockendichte und dem benötigten Wassergehalt herzustellen, welcher für eine optimale Verdichtung notwendig ist. Es werden Erkenntnisse zum erreichbaren Verdichtungsgrades der Böden und Empfehlungen für einen geeigneten Wassergehalt beim Einbau gewonnen.

Mit dem Kompressionsversuch soll ein Referenzwert zwischen Laborversuchen und Feldmessungen hergestellt werden. Dieser soll in einem weiteren Schritt (siehe Kapitel 5) als Vergleichswert zur Beschreibung der Verdichtungszustände an den MTB-Strecken herangezogen werden.

4.2 Bodenproben

4.2.1 Auswahl der Bodenproben

Die ausgewählten Bodenproben stammen alle von MTB-Strecken aus dem Raum Innsbruck und Umgebung. In Zusammenarbeit mit einer Bachelorarbeit ¹ am Institut für Geotechnik und Tunnelbau Innsbruck wurden während der Sommermonate 2018 Verformungsmessungen mit einem dynamischen leichten Fallgewichtsgerät (dLFG) an verschiedenen MTB-Strecken durchgeführt. Die Daten und Ergebnisse dieser Messungen stellen eine wesentliche Grundlage dieser Forschungsarbeit dar. Die Wahl der Bodenproben, welche für weitere Untersuchungen im Labor ausgewählt wurden, hängt mit den Standorten der durchgeführten Messungen mit der dynamischen Lastplatte zusammen. Wichtige Auswahlkriterien sind: Streckenabschnitte mit möglichst vielen und mehrfach durchgeführten Messungen mit der dynamischen Lastplatte, Strecken mit sehr hohen oder sehr niedrigen Resultaten der Verformungsmessungen, oder über die Strecke stark variierenden Ergebnissen der Messungen mit der dynamischen LFG. Die Entnahmen der Bodenproben, sind mitsamt der maßgeblichen Auswahlkriterien in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

¹Verdichtungsprüfung von Mountainbiketrails mittels dynamischer Lastplatte [16]

Die augenscheinlich unterschiedlichen Bodentypen (siehe Abb. 4.1) und deren Zusammensetzung hat auch einen Einfluss auf die Auswahl der Entnahmestellen. So wurden für den Hungerburg-Arzleralmtrail zwei repräsentative Proben für den gesamten Streckenverlauf gewählt. Bei der Begehung wurde festgestellt, dass der Boden im oberen Streckenabschnitt erdig und humusreich ist und im unteren Abschnitt der Boden sehr sandig ist. Für die weiteren MTB-Strecken wurde immer nur eine repräsentative Bodenprobe gewählt, da sich das Material entlang der Strecke augenscheinlich nicht auffällig unterschied.

Das Material von Dirlpark am Baggersee stellt eine Ausnahme in der Auswahl der Bodenproben dar. Es ist die einzige der ausgewählten Bodenproben, welche aus Fremdmaterial besteht und damit keinen natürlich gewachsenen Boden repräsentiert. Die Auswahl für geeignetes Material wurde anhand der Erfahrungen von den Erbauern des Dirlparkes getroffen. In den nachfolgenden Tabellen und Abbildungen wird diese Bodenprobe immer getrennt oder eigens zu den anderen Proben hervorgehoben. Die Verformungsmessungen mit der dynamischen Lastplatte am Dirlpark ergaben alle sehr hohe Ergebnisse und wurden deshalb für weitere Untersuchungen und Vergleiche ausgewählt.

Die ausgewerteten Daten der Verformungsmessungen mit der dynamischen Lastplatte und die Protokolle von den Laboruntersuchungen befinden sich im Anhang (siehe Kapitel A).



Abbildung 4.1: Bodenproben für Laboruntersuchungen (v.l.: MuA, HuO, HuU, 11er, DP)

Kürzel (Labor)	Ort	Entnahme- datum	Bemerkungen	Entnahme- menge
MuA (2791)	Chainless One (Mutterer Alm)	04.12.18	Waldboden, neu errichteter Trail, hohe Messergebnisse mit dLFG ;	ca. 80 Liter
HuO (2792)	Hungerburgtrail (oberer Teil)	27.11.18	Waldboden (erdig und humusreich), streuende Ergebnisse und Doppelmessungen mit dLFG;	ca. 100 Liter
HuU (2793)	Hungerburgtrail (unterer Teil) bzw. Arzleralmtrail	27.11.18	Waldboden (sehr sandig), Bodentyp Wechsel, hohe Messergebnisse und Doppelmessungen mit dLFG;	ca. 100 Liter
11er (2794)	Zwei Zweier Trail (Neustift im Stubai)	04.12.18	Waldboden, niedrige Messergebnisse mit dLFG, handgebauter Trail;	ca. 80 Liter
DP (2795)	RIP BMX Dirlpark (Baggersee)	12.12.18	Fremdmaterial aus Aushüben, Messergebnisse mit dLFG sehr hohe Bereich;	ca. 80 Liter

Tabelle 4.1: Entnahme der Bodenproben für Laboruntersuchungen

4.2.2 Probenentnahme

Die Bodenproben wurden alle im Zeitraum zwischen 27.11.18 und 12.12.18 entnommen. Zunächst wurden die Stecken begangen bzw. waren bereits bekannt und die Entnahmestellen wurden visuell festgelegt. Die Entnahmestellen wurden so gewählt, dass sie möglichst dem gewachsenen Boden entsprechen. In der gängigen Bauweise wird der gewachsene Boden bergseitig abgetragen und talseitig aufgeschüttet. Das Material wurde demzufolge von der Bergseite entnommen. Es wurde ein direkter Aufschluss (Schurf) gemacht. Das anstehende Material wurde mit einer Schaufel und einer Hacke bis eine Tiefe von 10 - 40 cm abgetragen und in Eimer gefüllt. Die Entnahmestellen sollten möglichst nahe am Streckenverlauf liegen. Dabei wurde darauf geachtet, dass durch die Entnahme des Materials die MTB-Strecken nicht beeinträchtigt oder beschädigt wurden. Die jeweils ausgewählte Bodenprobe sollten möglichst repräsentativ für die ganze Strecke oder Abschnitt sein. Die entnommenen Bodenproben sind alle gestörte Proben, d.h. ihre natürliche Lagerung ging durch das Schürfen und den Transport verloren. Pro repräsentative Probe wurden 4 bis 5 Eimer (je 25 Liter) Bodenmaterial entnommen.

Im Feld wurde bereits eine grobe Sortierung vorgenommen. Vereinzelte Steine (Durchmesser größer als 10 cm) und übermäßiges organisches Material (Tannenzapfen, Wurzel, Äst, usw.) wurden nicht entnommen und für weitere Analysen nicht berücksichtigt. Die aussortierten Stoffe stellten nur einen kleinen Massenanteil an der gesamten Menge dar. Das nicht Berücksichtigen dieser Stoffe kann damit begründet werden, dass beim Bau einer MTB-Strecke störende größere Steine, sowie übermäßiges organisches Material ebenfalls aussortiert und nicht als Baustoff für den Streckenbau eingesetzt wird.

4.2.3 Durchführung der Sieb- und Schlämmanalyse

Für die vorliegenden Bodenproben wurden kombinierte Sieb- und Schlämmanalysen durchgeführt. Die Notwendigkeit der Schlämmanalyse liegt dem hohen Anteil an Feinkorn (kleiner als 0,125 mm) zu Grunde.

Für die Klassifikationen in definierte Bodenarten, wurde pro Probe eine Menge von ungefähr 10 kg verwendet. Im ersten Schritt wurde eine Waschung der trockenen Bodenproben durchgeführt. Zweck dieser Waschung war es, den Anteil an Feinkorn abzutrennen. Der restliche Anteil (Korngröße $\geq 0,125\text{mm}$) der Ausgangsmenge wurde bis zur Gewichtskonstanz im Trockenofen getrocknet. Diese trockene Masse wurde in einem Siebturm eingefüllt und für 20 Minuten gerüttelt. Nachdem der Siebvorgang abgeschlossen war, wurden die einzelnen Rückstände der Massen auf jedem Sieb gewogen. Durch Aufsummieren der einzelnen Massenanteile und dem Feinkornanteil aus der Schlämmanalyse, erhält man die Kornverteilung für die Bodenprobe. Für eine genau Beschreibung des Versuches (siehe Abschnitt 3.3) und die Laborprotokolle (siehe Anhang A).

Die Auswertung der Kornverteilungen erfolgte mit der GGU-Software und wurde durch ein Matlab-File kontrolliert. Anhand der Anteile an den Hauptbodengruppen und die Massendurchgänge bei definierten Maschenweiten, kann die Einteilung laut ÖNORM B4412 vorgenommen werden. Der organische Anteil der Bodenproben wurde mittels Glühverlust ermittelt.

4.2.4 Klassifikation der Bodenproben

Die Körnungslinien in Abbildung 4.2 stellen die Zusammensetzungen der untersuchten Böden dar. In der Tabelle 4.2 sind für die vorliegenden Bodenproben, die wesentlichen Merkmale und ihre Bezeichnung laut ÖNORM B4400 zusammengefasst.

Im ersten Abschnitt der Tabelle 4.2 sind die Massenanteile der Hauptbodengruppen aufgelistet. Die Klassifikation für die fünf Bodenproben ergaben, dass der Hauptanteil der Kornfraktionen aller Proben im Korngrößenbereich von Sand liegt. Somit werden alle Böden der Hauptgruppe Sand zugeordnet. Lediglich bei einer Probe (11er) kann der Hauptanteil nicht eindeutig der Hauptgruppe Sand oder Kies zugewiesen werden, weil diese Kornfraktionen zu gleichen Anteilen vorkommen. Die Bodenproben unterscheiden sich hinsichtlich der Anteile an den Nebenbodengruppen stark, entweder ist der Anteil an Schluff oder der Anteil an Kies sehr hoch. Diese Nebenbodengruppenanteile erreichen bei manchen Bodenproben bis zu 35 % der Gesamtmenge. Im zweiten Abschnitt der Tabelle 4.2 sind die aufsummierten Massenprozentage der Bodenproben bei signifikanten Maschenweiten aufgelistet. Diese sind für die Klassifikation, und Bezeichnung laut Norm notwendig.

Im dritten Abschnitt der Tabelle sind die organischen Anteile aufgelistet, welche in der Bezeichnung laut Norm mit einem Kürzel angeführt werden können. Der organische Anteil liegt im Schnitt bei 4 - 5 % der Gesamtmasse.

Im vierten Abschnitt der Tabelle wird die Form der Körnungslinie anhand der Ungleichförmigkeitszahl C_U und der Krümmungszahl C_C angegeben und beschreiben. Für die Berechnung und Aussage dieser Kennzahlen wird auf dem Abschnitt 3.2.4 verwiesen.

Im letzten Abschnitt der Tabelle ist die Bezeichnung der Böden in symbolischer und ausgeschriebener Form aufgelistet. Diese Bezeichnungen ergeben sich aus den vorher aufgelisteten Informationen in der Tabelle. Alle Bodenproben weisen wesentliche Anteile der drei Hauptgruppen Schluff/ Ton, Sand und Kies auf. Ihre Kornverteilung erstreckt sich über die gesamte Bandbreite der Maschenweiten. Alle entnommenen Proben können der Übergruppe gemischt-körnige Böden (gmk) zugewiesen werden. Die Bodenprobe HuO weist 41 % Feinanteile auf und könnte somit auch der feinkörnigen Bodengruppe zugeordnet werden. Jedoch handelt es sich hier um eine Stichprobe und die Grenze von 40 % wird nur minimal überschritten. Die Körnungslinie dieser Probe hat einen ähnlichen weitgestuften Verlauf wie die anderen Messproben und wird deshalb auch den gemischt-körniger Böden zugeordnet.

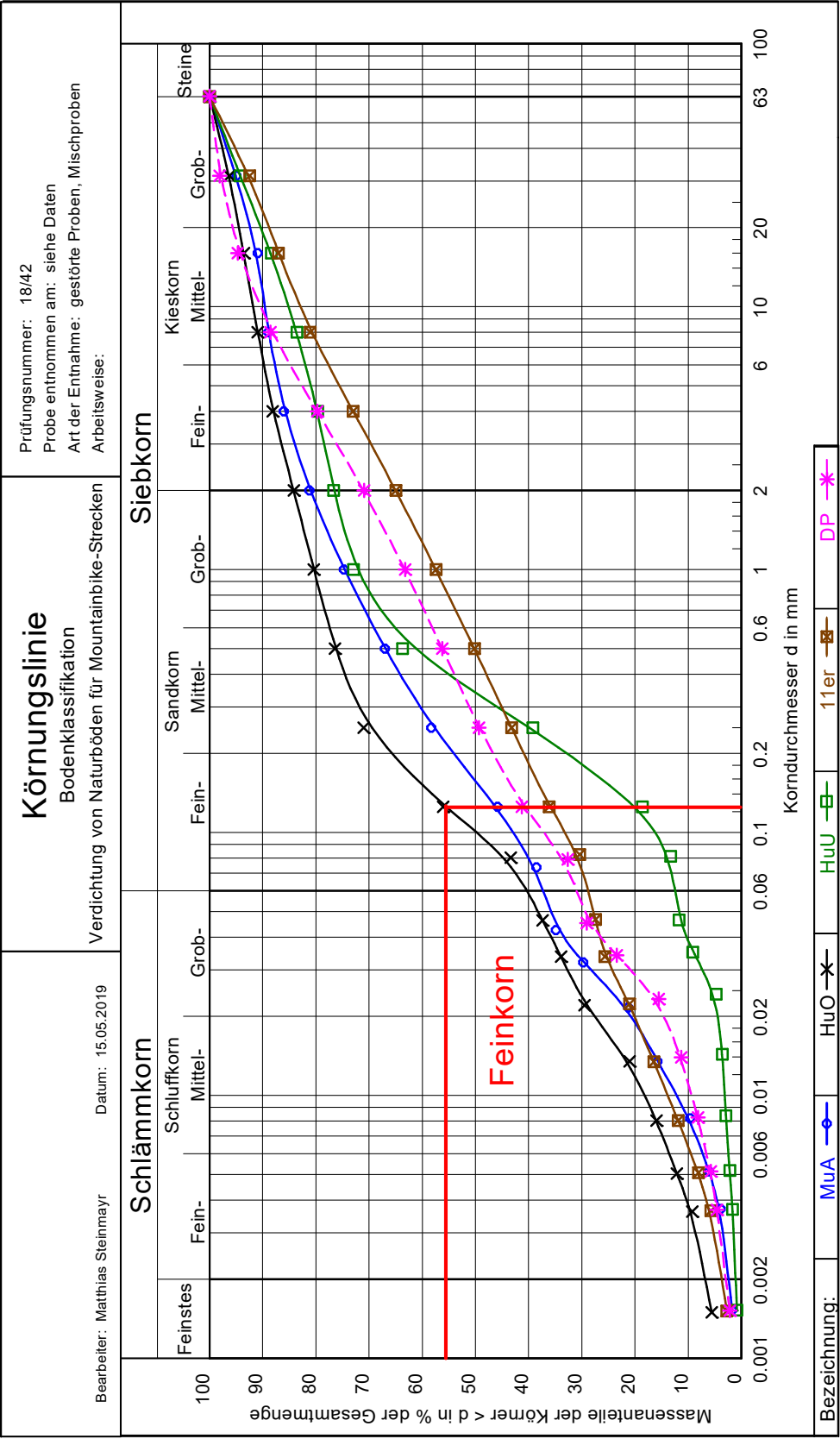


Abbildung 4.2: Kornverteilungslinien aller untersuchten Bodenproben; (Strichlierte Linie kennzeichnet die Bodenprobe (DP) aus Fremdmaterial)

Bez. (Lab. Nr.)	MuA (2791)	HuO (2792)	HuU (2793)	11er (2794)	DP (2795)
Anteile an Hauptbodenarten [%]					
Schluff/ Ton	37.7	41.0	12.7	29.1	31.4
Sand	43.3	43.2	63.8	35.9	39.7
Kies	19	15.8	23.5	35	28.9
Durchgang bei maßgebenden Maschenweiten [%]					
bei 0.002 mm	2.4	6.8	1.1	3.7	2.9
bei 0.06 mm	37.7	41	12.7	29.1	31.4
bei 2.0 mm	80.9	84.2	76.5	65	71.1
bei 63 mm	100	100	100	100	100
Organischer Anteil [%]					
org. Anteil	6.5	3.6	1.9	7.6	2.2
Form der Körnungslinie					
C_U	35.9	39.7	12.3	198.3	65.2
C_C	0.4	1	1.8	0.6	0.4
Bezeichnung laut Ö-Norm B 4400					
Hauptgruppe	gmk	fk/ gmk	gmk	gmk	gmk
Form	W	W	G	W	W
Symbolische	cl'', gr, $\overline{si}$	cl'', gr', $\overline{si}$,	si', gr, Sa,	cl'', si,	cl'', $\overline{si}$, $\overline{gr}$,
Bezeichnung	,Sa, w	Sa, w	g	Gr/Sa, w	Sa, w
ausgeschriebene	kiesiger,	sehr gering	schwach	schluffiger	stark
Bezeichnung	stark	toniger,	schluffiger,	Sand/	schuffi-
	schluffiger	schwach	kiesiger	Kies	ger, stark
	Sand	kiesiger,	Sand		kiesiger
		stark schluf-			Sand
		figer Sand			

Tabelle 4.2: Bestimmungsparameter und Klassifikation laut ÖNORM B4400 für die vorliegenden Bodenproben

4.2.5 Ergebnisse und Erkenntnisse

Alle untersuchten Bodenproben bestehen zum Hauptanteil oder Großteil aus Sand und beinhalten nennenswerte Nebenanteile an Schluff und Kies. Vier der fünf Verläufe der Körnungslinien sind sich sehr ähnlich. Einzig die Bodenprobe des unteren Teiles des Hungerburg Trails (HuU) weicht im Vergleich zu den anderen Bodenproben ab. Der Kornlinienverlauf der natürlich gewachsenen Böden (MuA, HuO und 11er) und der aus fremdmateriel bestehender Bodenprobe (DP) sind sich sehr ähnlich.

Für die untersuchten Proben kann festgehalten werden, dass alle Bodenproben weitgestufte Kornverteilungslinien aufweisen. Sie können alle der gemischt körnigen Bodengruppe zuzuordnen werden. Aus den Kornverteilungslinien kann gefolgert werden, dass die Böden eine gute Voraussetzung zum Erreichen eines hohen Verdichtungsgrades im eingebauten Zustand besitzen. Die Böden weisen teilweise einen sehr hohen Anteil an Feinkorn (≤ 0.125 mm) mit bis zu über 50 % auf. Ob die gemischtkörnigen Böden ein bodenmechanisches Verhalten von bindigen oder nicht bindigen Böden aufweisen, kann nicht mit Kennzahlen angegeben werden. Werden die vorliegenden Kornlinien mit Abbildung 4.3 verglichen, so verlaufen diese, durch den hohen Feinkorn Anteil im unteren Teil im bindigen Bereich dieser Grenzlilien. Im weiteren Verlauf liegen die Sieblinien hauptsächlich im Grenzbereich zwischen rolligen und bindigen Böden.

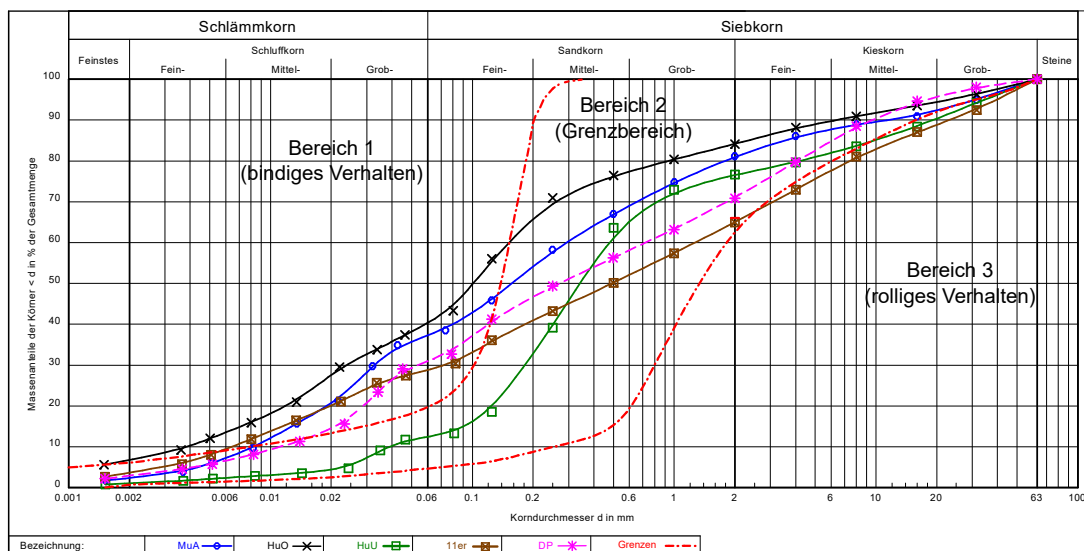


Abbildung 4.3: Sieblinien der untersuchten Bodenproben mit den Bereichsgrenzen für rolliges und bindiges Verhalten laut [7]

4.3 Durchführung und Auswertung der Proctor-Versuche

4.3.1 Durchführung der Proctor Versuche

Für die Bestimmung der maximal erzielbaren Trockendichte und der dazugehörige optimale Wassergehalt wurden Proctor Versuche durchgeführt.

Es wurde ein Standard Proctor Versuch mit einem Fallgewicht von 4,5 kg und einer Fallhöhe von 45 cm durchgeführt. Die Basis für diese Untersuchungen sind ungefähr 20 kg trockenes Ausgangsmaterial jeder Probe. Um absolut trockenes Ausgangsmaterial zu haben, befand sich die Proben vorher für mindestens 24 h im Trockenschrank.

Die Bodenprobe wurde im ersten Durchlauf trocken im Zylinder eingebaut. Der Boden wird in drei Lagen eingebaut und pro Schicht 22 Mal mit dem Fallbär verdichtet. Der gefüllte Zylinder wird anschließen

gerade abgezogen und gewogen. Über das bekannte Volumen des Zylinders kann die Dichte der Masse ermittelt werden. Bei den weiteren Durchgängen wird der Wassergehalt schrittweise gesteigert. Die erste Steigerung des Wassergehaltes lag meistens zwischen 4-5 %, bei den darauffolgenden Durchgängen wurde der Wassergehalt jeweils um 2 % erhöht. Der Vorgang wird so oft wiederholt bis die Masse im Zylinder abnimmt. Der vorhandene Wassergehalt wurde durch Entnahme von Teilproben in jedem Versuchsdurchgang ermittelt. Diese Teilmengen wurden sofort gewogen und anschließend bis zur Trockenkonstanz in den Trockenschrank gestellt. Aus der Differenz des Gewichtes der Teilmenge vor und nach dem Trocknen, wird der vorhandene Wassergehalt des Bodengemisches ermittelt. Die Auswertung der Versuche und Ermittlung der Trockendichten wurde mit der GGU-Software durchgeführt und durch einem Excel-File überprüft und ergänzt. In der Abbildung 4.4 ist eine exemplarische Darstellung einer einzelnen Proctorkurve zu sehen. In den Abbildungen 4.4 und 4.5 ist auf der Ordinate die Trockendichte $[\text{g}/\text{cm}^3]$ und auf der Abszisse ist der Wassergehalt $[\%]$ aufgetragen. Alle weiteren Protokolle befinden sich im Anhang A.

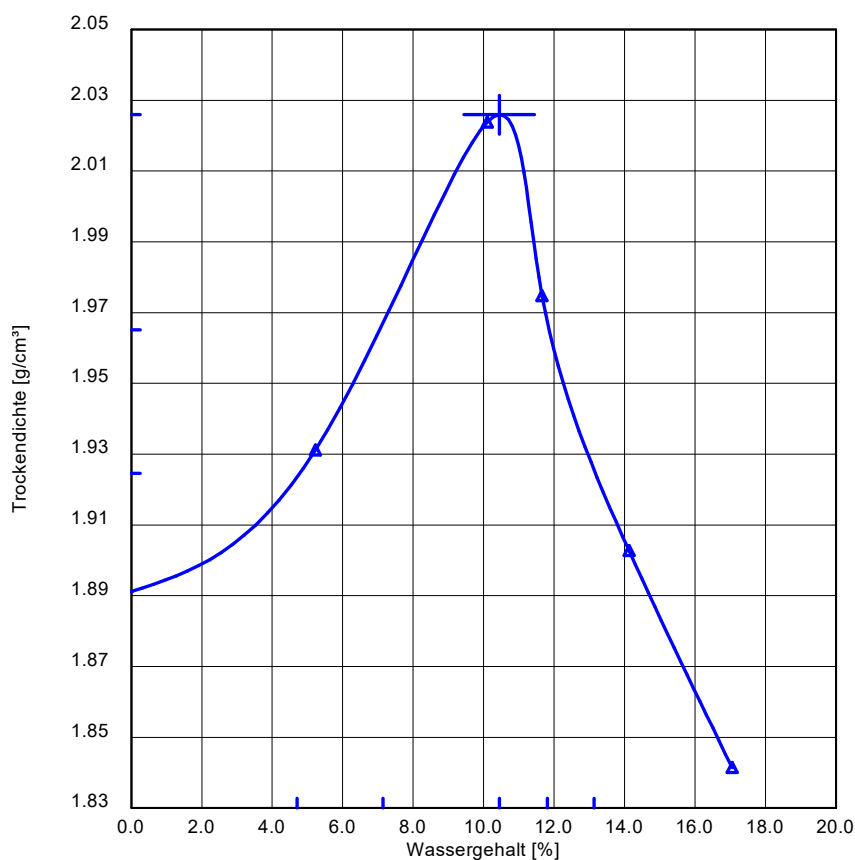


Abbildung 4.4: Auswertung einer Proctorkurve (DP) im Detail mit GGU-Software

4.3.2 Ermittlung der Trockendichten und Wassergehaltes

In der Abbildung 4.5 sind die Proctorkurven für die fünf untersuchten Bodenproben gegenübergestellt. Die beiden Bodenproben (DP und HuU), welche die höchste Trockendichte erzielen, benötigen den geringsten optimalen Wassergehalt für eine optimale Verdichtung. Diese Proben weisen auch den höchsten Anteil an Sand auf. Der Massenanteil von Kieskorn liegt bei beiden Proben ungefähr bei 25 %. Von Interesse ist auch, dass diese beiden Proben die geringsten Anteile an organischen Bestandteile aufweisen. Die aus Fremdmaterial bestehende Bodenprobe (DP) erreicht die höchste Trockendichte im Vergleich zu den anderen Proben.

Die Bodenproben (11er und MuA) besitzen die höchsten Anteile an organischen Materialien und benötigen gleichzeitig den höchsten Wassergehalt zur optimalen Verdichtung. Folglich kann ein Zusammenhang zwischen hohem organischen Anteil und steigendem Wasserbedarf festgestellt werden. In der Tabelle 4.3 sind die Versuchsergebnisse mit Zahlenwerten aufgelistet. Es sind die erzielten maximalen Proctordichten, sowie der 97 % Werte und 95 % Werte diese Dichten aufgelistet. Diese Werte entsprechen dem prozentualen Verhältnis zur maximalen Proctordichte. Im Abschnitt Wassergehalt, wird der optimale Wassergehalt und die Wassergehalte zum Erreichen der 97 % und 95 % Werte der Trockendichten angegeben.

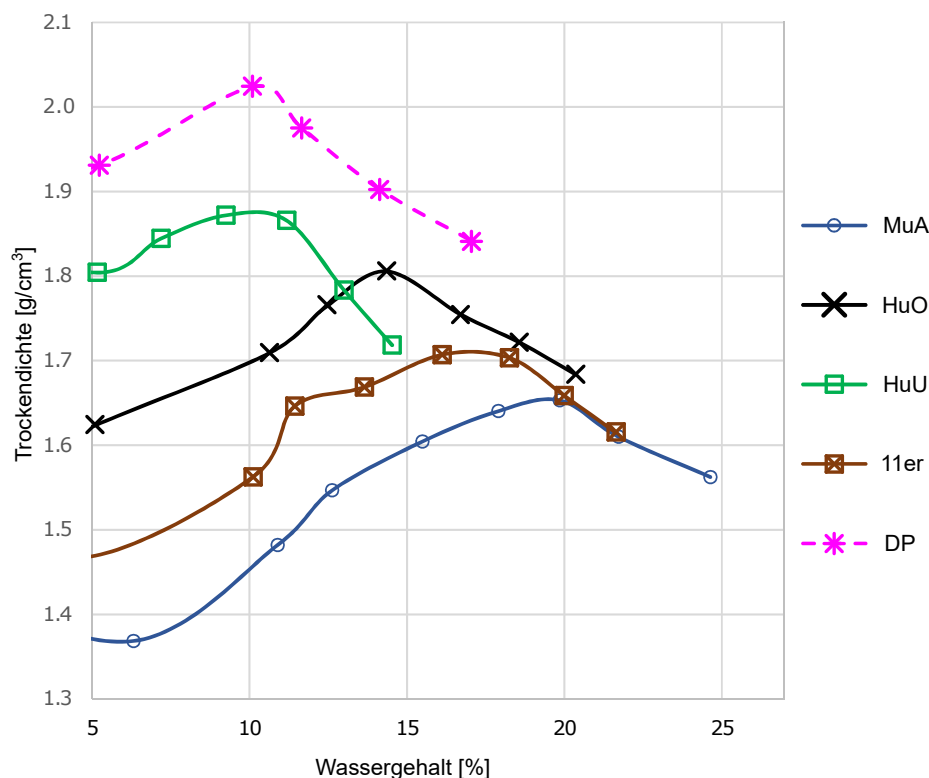


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung aller Proctorkurven der untersuchten Bodenproben

	MuA		HuO		HuU		11er		DP	
Trockendichten [g/m³]										
ρ_{Pr} (100%)	1.66		1.81		1.87		1.71		2.03	
ρ_{Pr} (97%)	1.61		1.75		1.82		1.66		1.97	
ρ_{Pr} (95%)	1.57		1.72		1.78		1.63		1.93	
Wassergehalt [%]										
w_{optimal}	19.5		14.2		10.2		17.1		10.4	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
w (97%)	15.6	21.9	12.3	16.8	6.4	11.3	12.6	19.9	7.1	11.8
w (95%)	13.8	23.9	11.4	19.0	5.6	12.2	11.2	21.2	4.7	13.1

Tabelle 4.3: Trockendichten und zugehörige Wassergehalte für die Bodenproben; (Minimal und maximal Werte in **fett** dargestellt)

4.3.3 Vergleiche mit der Literatur

Die Abbildung 4.6 stellt Proctorkurven für unterschiedliche Bodenarten dar. Auf der Ordinate sind die Trockendichten und auf der Abszisse ist der Wassergehalt aufgetragen. Die Proctorkurven werden durch die Sättigungslinie begrenzt.

Vergleicht man die Resultate aus den Laborversuchen mit den hier angegebenen Werten, erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung (vergleiche Abb. 4.6). Die erreichten Trockendichte liegen alle in den hier angegebenen Bereichen von Sand und Kies. Lediglich die Bodenprobe für MuA liegt leicht unterhalb der Grenze für Sand und fällt aus der Reihe im Vergleich zu den Anderen. Diese Bodenprobe besitzt laut der Klassifikation den höchsten Schluffanteil (35 %) und einen der höchsten organischen Anteile (6,5 %). Der optimale Wassergehalt dieser Probe liegt im Vergleich mit den Anderen relativ hoch. Werden die Ergebnisse für diese Bodenproben (MuA) mit der Abbildung 4.6 verglichen, so liegt diese im Bereich der Schluffe und plastischen Böden.

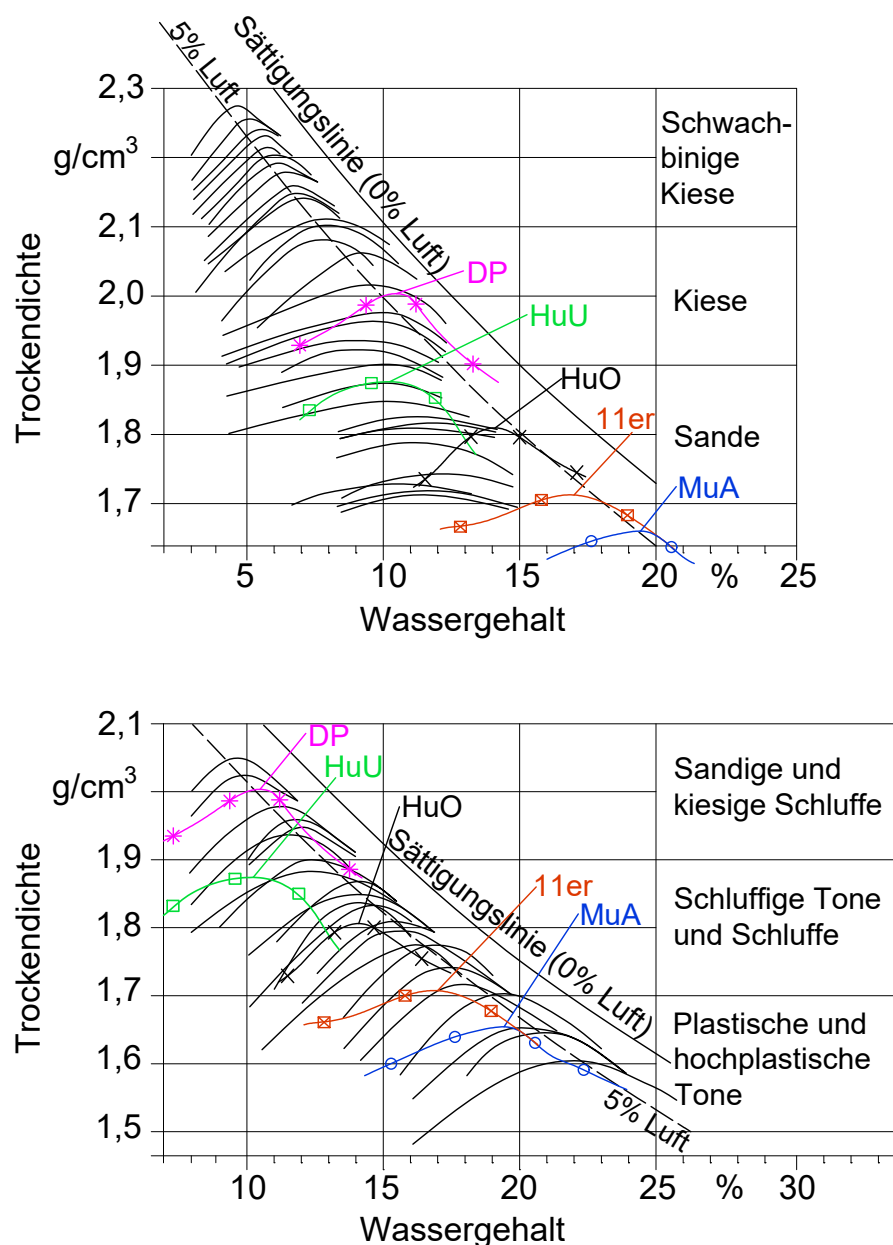


Abbildung 4.6: Gegenüberstellung von den Proctorkurven der Bodenproben mit Proctorkurven und zugehörige Sättigungskurven aus der Literatur (Abbildung in Anlehnung an [4])

4.3.4 Ergebnisse und Erkenntnisse

Der Einfluss eines geeigneten Wassergehaltes auf die erzielbare Trockendichte wird hier für die untersuchten natürlichen Böden eindeutig bestätigt. Die Grenzen für den erforderlichen Wassergehalt für eine günstige Verdichtbarkeit der Böden können zwischen 10 - 15 % der Massen festlegen werden. In der Abbildung 4.7 wird das Verhältnis von Verdichtungsgrad und Wassergehalt dargestellt. Es sind zwei Grenzlinien für den Wassergehalt (10 - 15 %) angegeben, bei Einhaltung dieser Grenzen wird unabhängig von den Bodenarten ein Verdichtungsgrad von 95 % der maximalen Trockendichte für alle fünf untersuchten Proben erzielt.

Für die Verdichtung von bindigen Böden wird laut Literatur empfohlen, sich auf dem trockenen Ast

der Verdichtungskurve zu befinden, sprich links von Maximalwert. [6] Für nicht bindige (rollige) Böden hängt die erreichte Trockendichte nicht vom Wassergehalt ab. Bei diesen Böden wird empfohlen den Boden etwas nasser (+1 % bis +3 %) als der optimale Wassergehalt einzubauen. [3]

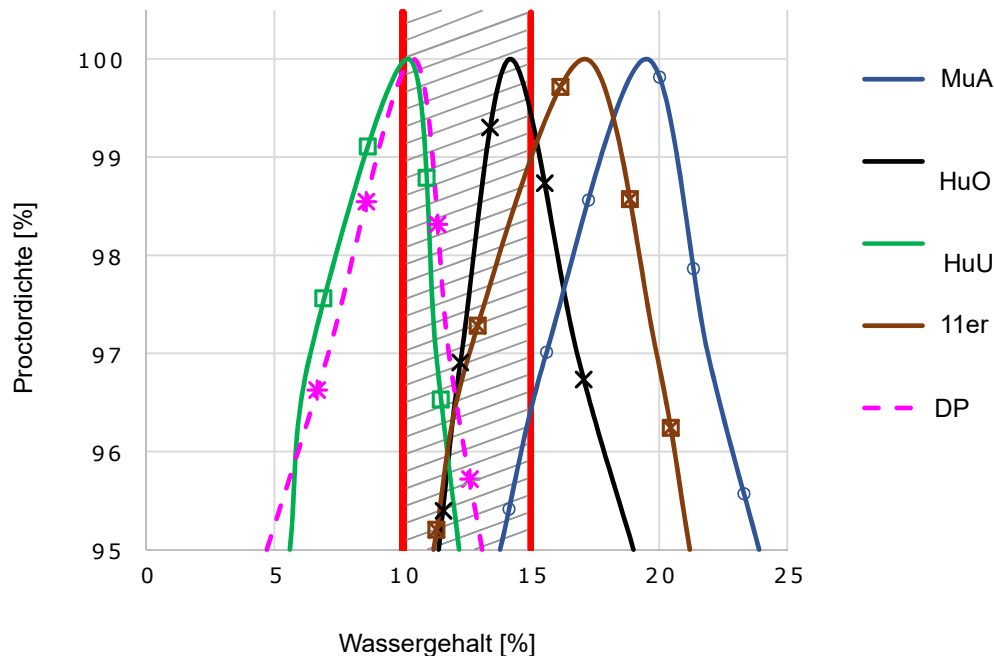


Abbildung 4.7: Grauer Bereich markiert Wassergehaltsgrenzen für das Erreichen einer Proctordichten von mindesten 95%; (Punkte dienen nur zur Veranschaulichung der einzelnen Linien)

Für die Qualität und Dauerhaftigkeit einer MTB-Strecke ist der Wassergehalt des Boden beim Einbauen ein wesentlicher Faktor. Als anschauliches Beispiel kann folgende Empfehlung gemacht werden. Für einen 1 m breiten und 10 cm tief zu verdichteten Trail, sollte 10 Liter Wasser (ca. 1 Gießkannen mit 10 Liter) pro Laufmeter eingebracht werden.

Es kann auch festgehalten werden, dass mit zunehmendem Anteil an organischen Material in den Böden der Wasserbedarf für gutes Verdichten steigt. Organische Bestandteile binden viel Wasser und erhöhen den Porenanteil im Boden, dadurch verschlechtern sich die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften. [8]

4.4 Durchführung und Auswertung der Kompressionsversuche

4.4.1 Durchführung

Die Durchführung des Kompressionsversuch hat den Zweck Referenzwerte für die Steifigkeit der Böden zu erhalten. Diese Werte sollen in einem weiteren Schritt der Einordnung der Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte dienen.

Für die Durchführung der Kompressionsversuche mittels Ödometergerät wurden zwei Bodenproben ausgewählt. Der Be- und Entlastungsvorgang erstreckte sich über einem Zeitraum von zwei Wochen.

Die Auswahl für den Kompressionsversuch wurde auf die natürlich gewachsenen Böden begrenzt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Proctorversuchen und der Verformungsmessungen mit der dynamischen Lastplatte fiel die Wahl auf HuO und MuA. Da für den Hungerburgtrail zwei repräsentative Bodenprobe entnommen wurden (HuO und HuU), wurde jene Probe mit der geringeren Proctordichte (HuO) ausgewählt. Eine höhere Trockendichte hat eine höhere Steifigkeit zur Folge. Deshalb kann das

Ergebnis der Steifigkeit von der Probe HuO auf die ganze MTB-Strecke als untere Grenze angesetzt werden, da diese auch von zweitem Abschnitt mindestens erreicht werden sollte. Die Probe HuO lieferte für den Proctorversuchen eine Trockendichte genau in der Mitte der fünf Proben. Die Probe (MuA) wurde ausgewählt, da diese die geringste Proctordichte erreichte, jedoch die Messungen mit der dynamischen Lastplatte in einem guten Bereich lagen im Vergleich aller Messergebnisse.

Die Probekörper wurden wie in Abschnitt 3.5.2 beschrieben in das Versuchsgerät eingebaut und stufenweise belastet bzw. entlastet. Diese Auswertung erfolgte hier automatisiert mit der GGU-Software und wurde stichprobenartig mit händischer Berechnung überprüft. Für die Randbedingungen der weiteren Vergleiche wird auf dem Abschnitt 3.7.4, Korrelation von dynamischen und statischen Verformungsmodul und Steifemodul verwiesen.

4.4.2 Ergebnisse der Steifemoduln

Die Abbildungen 4.8 und 4.9 stellen die Drucksetzungskurve für die beiden untersuchten Bodenproben dar. In den Tabellen 4.4 und 4.5 sind die dazugehörigen Versuchswerte aufgelistet. Es werden dabei nur die Anfangs- und Endwerte für jede Belastungsstufe angegeben. Diese sind auch die notwendigen Werte zum ermitteln der Steifemoduln. Die gesamten Daten über den zeitlichen Verlauf befinden sich im Laborprotokoll zum Versuch im Anhang A.

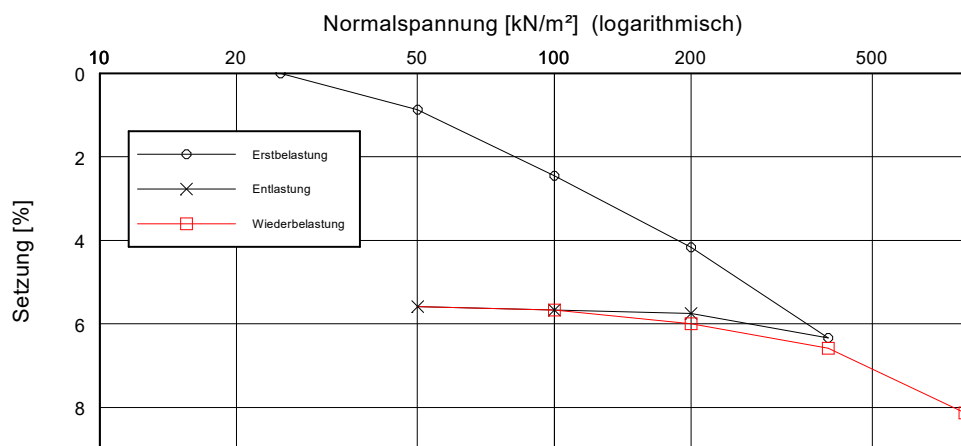


Abbildung 4.8: Darstellung der Drucksetzungskurve für HuO aus dem Kompressionsversuch

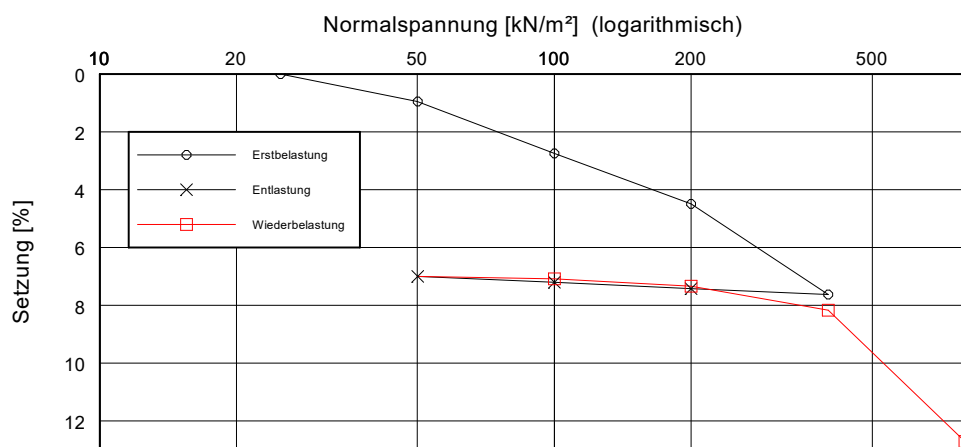


Abbildung 4.9: Darstellung der Drucksetzungskurve für MuA aus dem Kompressionsversuch

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Normalspannung [kN/m ²]	25.0	50.0	100.0	200.0	400.0	200.0	100.0	50.0	100.0	200.0	400.0	800.0
Meßuhrablesung [mm]	0.160	0.265	0.455	0.660	0.920	0.850	0.840	0.830	0.840	0.880	0.950	1.135
Steifemodul [MN/m ²]		2.9	3.1	5.7	8.8	-	-	-	56.6	28.3	32.2	24.2

Tabelle 4.4: Versuchswerte und Steifemoduln (HuO) (Entlastungmoduln sind nicht angegeben)

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Normalspannung [kN/m ²]	25.0	50.0	100.0	200.0	400.0	200.0	100.0	50.0	100.0	200.0	400.0	800.0
Meßuhrablesung [mm]	0.340	0.455	0.670	0.880	1.255	1.230	1.205	1.180	1.190	1.220	1.320	1.865
Steifemodul [MN/m ²]		2.6	2.8	5.6	6.1	-	-	-	55.8	37.2	22.2	8.1

Tabelle 4.5: Versuchswerte und Steifemoduln (MuA) (Entlastungmoduln sind nicht angegeben)

4.4.3 Vergleichswert

Als Vergleichswert für den Erstbelastungsmodul (E_{v1}) wurde die Laststufe zwischen 50 - 100 kN/m² des Ödometersversuches herangezogen (siehe Tab. 4.4 und 4.5). Für den Wiederbelastungsmodul (E_{v2}) wurde der Wert derselben (50 - 100 kN/m²) Laststufe genommen. Die Ergebnisse der Steifemoduln dieser Laststufen wurden für den Vergleichswert gemittelt. Für den E_{v1} -Wert ergibt sich dabei ein geringerer Wert als jener für die nächst höhere Laststufe zwischen 100 - 200 kN/m². Beim E_{v2} -Wert ist es umgekehrt und es ergibt sich ein höherer Steifemodul für diese Laststufe. Dadurch wird einmal der höhere und einmal der niederer Wert der Ergebnisse aus dem Kompressionsversuch als Vergleichswert verwendet. In den nachfolgenden Vergleichen werden jedoch beide Werte E_{v1} und E_{v2} separat verglichen. Ergänzend wurde die Übereinstimmung der erreichten Dichten aus den Proctorversuchen mit den Einbaudichten aus den Kompressionsversuch verglichen, siehe Tabelle 4.6. Die Gegenüberstellung der in den Versuchen eingebauten Trockendichten ergibt, dass die optimalen Trockendichten in den Proctorversuchen etwas oberhalb als die in den Kompressionsversuchen erreichten Dichten liegen. Die hier angeführten Trockendichten für die Kompressionsversuche, sind jene die am Ende der Versuchsreihe vorlagen. Folglich sind die Trockendichten für die gewählten Laststufen (zwischen 50 - 100 kN/m²) im Verhältnis zum Endwert geringer. Auch der direkte Vergleich mit den Proctordichten zeigt, dass die Einbaudichten in den Kompressionsversuchen noch gesteigert werden können, daraus folgt ein höhere Steifemodul. Aus dieser Gegenüberstellung kann zusammenfassend gesagt werden, dass die nachfolgenden Vergleichswerte zum Einordnen der Feldversuche, höher angesetzt werden könnten.

	MuA	HuO
ρ_{Pr} [g/cm ³]	1.66	1.81
ρ_{Oedo} [g/cm ³]	1.53	1.69

Tabelle 4.6: Gegenüberstellung der Dichten aus Proctorversuchen und Ödometersversuchen

5 Auswertung, Vergleich und Interpretation der Messdaten mit der dynamischen Lastplatte

5.1 Vorbemerkung

Im diesen Kapitel werden die Messungen mit der dynamischen Lastplatte analysiert, diese wurden an mehreren MTB-Strecken durchgeführt.

Dabei wird auf die Erhebung der Daten, die statistische Auswertung und die Umrechnungen auf einem Vergleichswert eingegangen. Es wird versucht die Daten bestmöglich zu interpretieren und schlüssige Erkenntnisse zu ziehen. Anhand der gemessenen Verformungsmoduln wird der Zustand der Bodenverdichtung entlang der MTB-Strecken bewertet. Aus den gewonnenen Erkenntnisse wird eine Empfehlung an die Anforderungen des Verformungsmoduln bei der Verdichtungskontrolle mittel der dynamischen Lastplatte für MTB-Strecken getroffen.

5.2 Durchführung der Messungen

Die Verformungsmessungen mit der dynamischen Lastplatte fanden im Sommer und Herbst 2018 statt. Diese Messungen wurden in Zusammenarbeit mit einer Bachelorarbeit, wie bereits Abschnitt 4.2.1 erwähnt, erhoben. Mehrere MTB-Strecken wurden begangen und deren Verformungsmoduln mittels dynamischer Lastplatte gemessen.

Die ersten Messungen fanden entlang der Strecken an charakteristischen Stellen (z.B langer gerader Abschnitt, vor einem Sprung oder Kurve) statt. Die darauf folgenden Messreihen wurden immer in einem regelmäßigen Intervall (alle 50 m oder 100 m) durchgeführt. Durch die Intervallmessungen ist eine gewisse Form an Objektivität in einer Messreihe gewährleistet.

Es wurden unterschiedliche MTB-Strecken aufgemessen, welche sich in den Bauarten (mit und ohne Verdichtung) und in dem Verlauf der Streckenabschnitte (durch Wald oder landwirtschaftliches Gebiet) unterscheiden. Größtenteils wurden Strecken, welche aus natürlich gewachsenem Boden gebaut wurden, aufgemessen, jedoch wurden auch am Dirtpark (Innsbruck), am Pumptrack (Mutterer Alm) sowie in Blaustein Messungen durchgeführt. Diese Strecken wurden mit Hilfe von Fremdmaterial errichtet und teilweise deutlich besser verdichtet.

Zusätzlich wurden bei den Feldmessungen auch einige Messung (z.B. kreuzender Forstweg oder Wanderwege) aufgenommen. Diese Daten werden für die Einordnung der Qualität der Verdichtung herangezogen. Die Forstwege werden mit einem Schotter hergestellt, Wanderwege bestehen teilweise deutlich länger als die MTB-Strecken, diese Messungen liefen meisten höhere Verformungsmoduln.

5.3 Übersicht über die Messergebnisse

Zu Beginn wird ein Überblick über die gesamten Messreihen mit der dynamischen Lastplatte gegeben, siehe Abbildung 5.1. In der Tabelle 5.1 wird eine detailliertere Auflistung der einzelnen Messungen mit den statistischen Werten und Besonderheiten gegeben. Diese Tabelle dient als Hilfestellung und zum Verständnis der Abbildung 5.1.

Es wird eine statistische Zusammenfassung der Werte, Median und Mittelwert aufgelistet, die Anzahl der erfolgten Messungen und auch der fehlgeschlagenen Messungen pro Strecke werden aufgelistet. Wichtige Informationen über das eingesetzte Material zur Herstellung der Strecken sind ebenfalls in der Tabelle enthalten. Die Markierung mit einem Stern in der Legende weist darauf hin, dass beim Bau der MTB-Strecke, Fremdmaterial eingebracht wurde.

Für die Erklärung der statistischen Darstellung der Boxplots wird auf den nächsten Abschnitt 5.5 verwiesen.

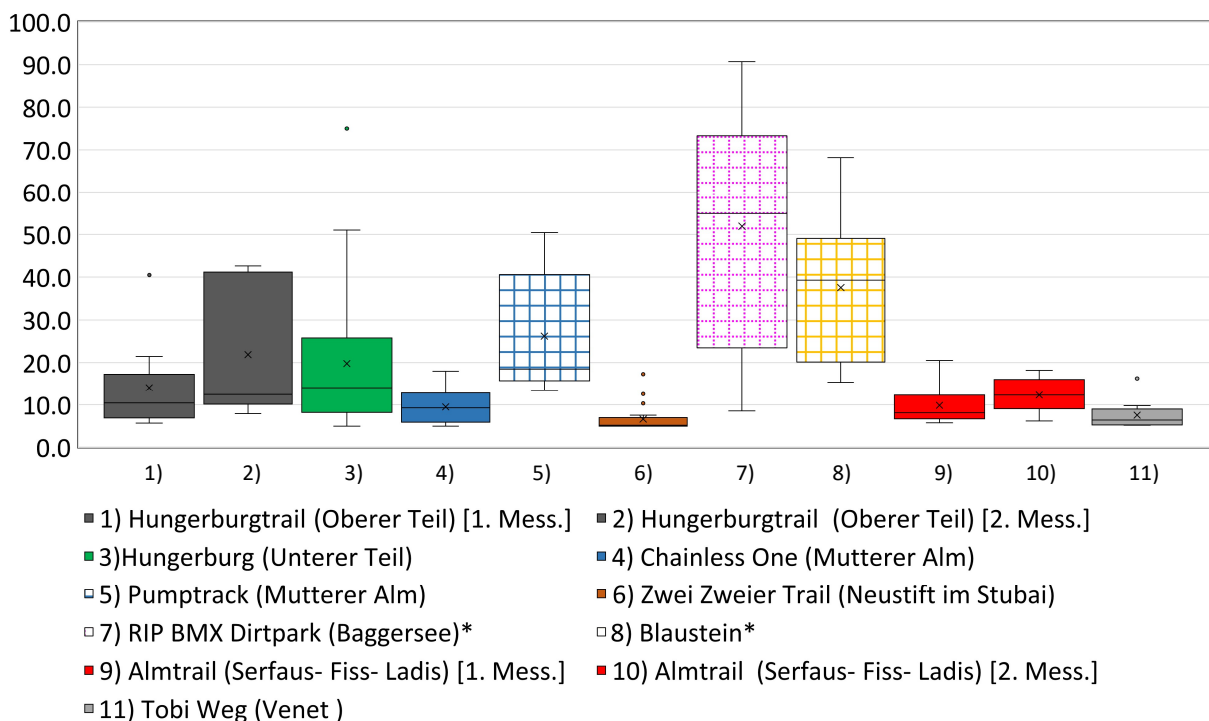


Abbildung 5.1: Übersicht aller Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte (* markiert Strecken die aus Fremdmaterial bestehen); der horizontale Strich markiert den Median, x markiert den Mittelwert, die Box markiert das untere und obere Quartil (50% der Werte), die oberen und unteren Linien markieren den 1,5-fache Interquartilsabstand, Punkte außerhalb stellen Extremwerte dar;

Im Unterschied zur Abbildung 5.1 wurden in der Abbildung 5.2 die Strecken, welche mit Fremdmaterial errichtet sind entfernt. Diese Strecken (5,7,8) weisen besonders hohe Verformungsmoduln auf und es ist anzunehmen, dass diese sicherlich die obere Grenze der Verdichtbarkeit darstellen. Die Abbildung 5.2 gibt eine detailliertere Darstellung der Messergebnisse der Verformungsmodule im niederen Bereichen wieder.

Bezeichnung	Anz. Mess. (stat.)	fehlg. Mess.	Mittelwert E_{vd} [MN/m ²]	Median E_{vd} [MN/m ²]	Proben- entnahme	Fremd- material
Hungerburgtrail (oberer Teil) [1.Mess.]	11 (9)	0	14.1	10.4	ja	nein
Hungerburgtrail (oberer Teil) [2.Mess.]	9 (9)	0	21.9	12.4	ja	nein
Hungerburgtrail (unterer Teil) bzw. Arzleralmtrail	31 (30)	2	19.8	14.1	ja	nein
Chainless One (Mutterer Alm)	22 (22)	4	9.5	9.2	ja	nein
Pumptrack (Mutterer Alm)	4 (4)	0	26.2	18.5	nein	nein
Zwei Zweier Trail (Neustift im Stubaital)	38 (36)	17	6.6	5.1	ja	nein
RIP BMX Dirtpark (Baggersee)	12 (12)	0	51.9	54.9	ja	ja
Blaustein	15 (12)	2	37.6	39.3	nein	ja
Almtrail (Serfaus- Fiss-Ladis) (SFL) [1.Mess.]	9 (9)	0	9.8	8.1	nein	nein
Almtrail (Serfaus- Fiss-Ladis) (SFL) [2.Mess.]	12 (12)	0	12.3	12.3	nein	nein
Tobi Weg (Venet)	15 (13)	0	7.5	6.4	nein	nein

Tabelle 5.1: Übersicht der statistischen Auswertungen der Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte. Die Zahl in der Klammer gibt die Anzahl der berücksichtigten Messergebnisse in der statistischen Auswertung wieder.

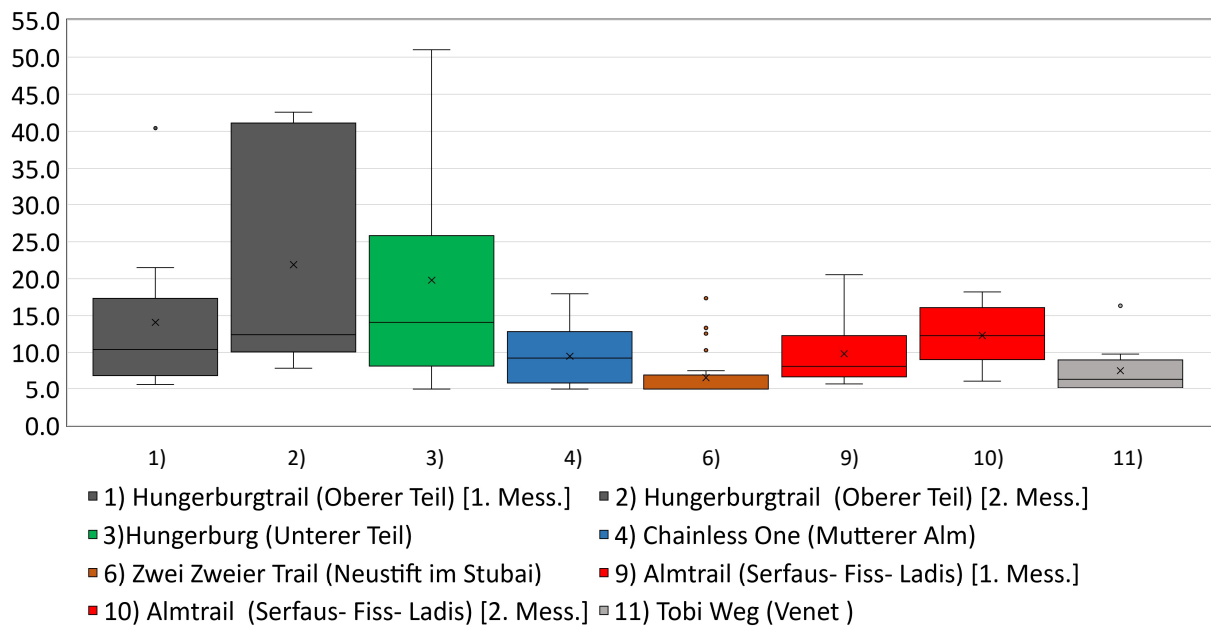


Abbildung 5.2: Detaillierte Übersicht der Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte.; der horizontale Strich markiert den Median, x markiert den Mittelwert, die Box markiert das untere und obere Quartil (50% der Werte), die oberen und unteren Linien markieren den 1,5-fache Interquartilsabstand, Punkte außerhalb stellen Extremwerte dar;

5.4 Messergebnisse entlang der Strecke

In den nachfolgenden Abbildungen sind die einzelnen Messergebnisse der Strecke folgend aufgetragen. Die Qualität der Bodenverdichtung wird so entlang des Streckenverlaufes aufgezeigt. Aus den Abbildungen können eventuelle Fehlstellen der Verdichtung erkannt werden und ob diese an Messpunkten hintereinander vorkommen. Die grün markierten Balken markiert jene Stelle, welche am nächsten zur Entnahmestelle der repräsentativen Bodenprobe für die jeweilige Strecke liegen.

Für den Trail HuO (Abbildung 5.3 und 5.5) wurden zwei Bodenproben (siehe Abschnitt 4.2.1) zur Bodenklassifikationen für die gesamte Strecke entnommen. Für den Kompressionsversuch wurde jedoch nur die Bodenprobe mit der geringeren Trockendichte ausgewählt.

Wird das Auftreten der Stellen mit hohen oder niederen Werten der Strecke entlang betrachtet, so treten diese Stellen meistens hintereinander auf und nicht alternierend. Es sind Abschnitte mit hohen Messwerten und Abschnitte mit niederen Messwerten vorhanden. Gründe dafür können in streuenden Bodenzusammensetzungen, hohen organischen Anteilen (Abschnitte durch Wald) oder besonders unzugänglichem Gelände liegen, wodurch eine ausreichende Verdichtung des Bodens erschwert wird.

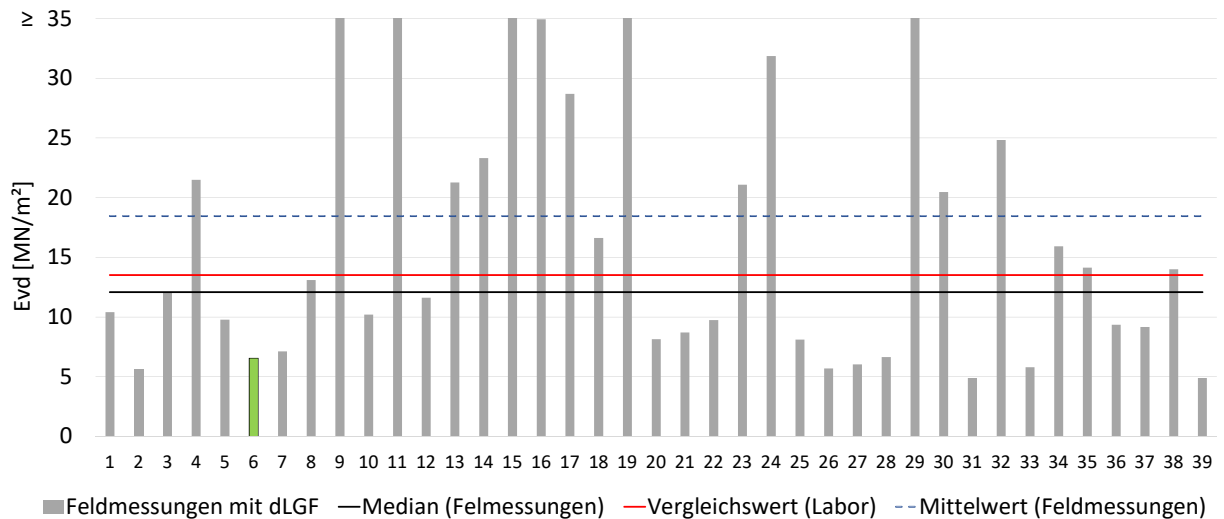


Abbildung 5.3: Messergebnisse für E_{vd} mit der dynamischen LFG (HuO und HuU)
(Grüner Balken markiert die Messung in unmittelbarer Umgebung zur Entnahmestelle der Bodenprobe)

Für den zweiten direkten Vergleich (MuA) wurde der Teil des Pumptracks (siehe Anhang A.2) in der statistischen Auswertung und in dieser Abbildung nicht berücksichtigt. Dieser wurde deutlich besser verdichtet, und nicht mit der MTB-Strecke vergleichbar.

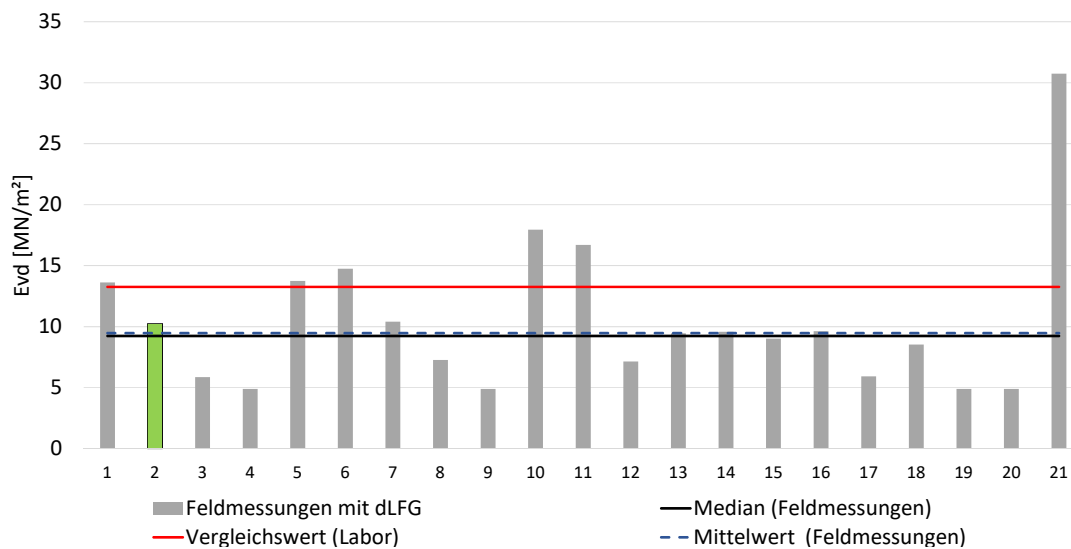


Abbildung 5.4: Messergebnisse für E_{vd} mit der dynamischen LFG (MuA)
(Grüner Balken markiert die Messung in unmittelbarer Umgebung zur Entnahmestelle der Bodenprobe)

5.5 Datenanalyse und statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung werden nur Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte herangezogen, welche direkt entlang der MTB-Strecken aufgenommen wurden. Messungen an kreuzenden Forst- und Wanderwegen wurden für die Statistik nicht berücksichtigt, siehe Anhang A.

Die dynamische Lastplatte liefert nur ein Resultat des Messdurchganges, wenn der vorliegende Boden einen Verformungsmodul von $\geq 5 \text{ MN/m}^2$ erreicht. Ist das nicht der Fall wird die Messung als fehlerhaft dokumentiert und liefert kein Ergebnis. Für die Auswertung sind diese Messungen jedoch von großer Bedeutung, denn sie stellen besonders unzureichend verdichtete Abschnitte dar. Für die weitere statistische Analyse wurde für diese Messungen ein Wert von $4,9 \text{ MN/m}^2$ angenommen. Dieser Wert ist für die meisten nicht erfolgten Messungen sicherlich zu hoch angesetzt, jedoch werden die quantitativen Messergebnisse in diesen Bereich nicht weiter untersucht, da ein weit höherer Verformungsmodul für einen gut verdichteten MTB-Strecke anzustreben ist.

Es muss erwähnt werden, dass die Wahl der Größe dieses Wertes Einfluss auf den Mittelwert hat. Der Median ist aber davon nicht betroffen. Für die nachkommenden Analysen wird der Median als Vergleichswert herangezogen. Dieser stellte sich als deutlich robuster gegenüber Extremwerten, und wie vorher erwähnt, bei nicht erfolgten Messungen heraus. In den weiteren Darstellungen wird der Mittelwert jedoch der Vollständigkeit halber angegeben.

Die Messreihen werden in der Form eines Boxplot präsentiert. In den Grafiken 5.1 und 5.2 markiert das x in der Box den Mittelwert und der horizontale Strich in der Box repräsentiert den Median. Die Box selber entspricht den Bereich in dem die mittleren 50 % der Werte liegen, sie werden durch das untere (25% der Daten) und obere Quartil (75% der Daten) begrenzt. Die einzelnen Punkte stellen Ausreißer und somit Extremwerte der Messungen dar. Ein Wert wird als Ausreißer definiert, wenn er größer als der 1,5 fache Interquartilsabstand (obere und untere Grenze der Box) ist.

5.6 Umrechnung der Verformungsmoduln

Um die Ergebnisse aus den Laborversuchen mit den Messergebnissen von der dynamischen Lastplatte vergleichen zu können müssen diese auf einen vergleichbaren Wert umgerechnet werden. In der Literatur werden verschiedene Umrechnungsansätze vorgeschlagen. Da die untersuchten Bodenproben nicht eindeutig einer der Bodenarten zugewiesen werden können, werden zunächst mehrere Ansätze in Betracht gezogen, siehe Abschnitt 3.7.4.

Zwischen den Kenngrößen E_{vd} , E_{v1} und E_{v2} gibt es keine konstante Beziehung die für alle Bodenarten gültigkeit hat. Laut RVS 08.03.04 werden zwei Umrechnungsvorschläge angegeben. Basierend auf der Bodenart, wird ein Vorschlag für bindige und für nicht bindige Böden gemacht. Für die untersuchten Böden liefert der Vorschlag für nicht bindige Böden die plausibleren Umrechnungsergebnisse. Der statische und dynamische Plattendruckversuch unterscheidet sich in ihrer Prüfgeschwindigkeit und im ausgeübten Bodendruck. Laut Hersteller der dynamischen Lastplatte wird empfohlen für jedes Bauvorhaben, Vergleichsversuche zwischen statischem und dynamischem Plattendruckversuch durchzuführen. Es war im Rahmen der Arbeit nicht möglich einen statischen Plattendruckversuch durchzuführen. Meistens führen diese Strecken durch steiles Gelände und es liegen beengte Platzverhältnisse vor. Diese Faktoren erschweren das Anbringen eines geeigneten Widerlagers für einen statischen Plattendruckversuch.

Die gemessenen Verformungsmoduln sind teilweise im sehr niedrigen Bereich, wodurch sich unphysikalische Werte für den Erstbelastungsmodul laut Umrechnungsansatz für bindige Böden ergeben. Diese negativen Werte werden nicht zum Vergleich herangezogen. Die Umrechnungsansätze kommen aus dem Straßenbau und sind für gut verdichtete Unterbauten und ungebundene Tragschichten mit höheren Beanspruchungen ausgelegt. Die Messungen mit einer dynamischen Lastplatte auf solchen Untergründen ergeben deutlich höhere Verformungsmoduln. Die verschiedenen Umrechnungsansätze sind im Detail im Abschnitt 3.7.4 aufgelistet und die detaillierten Umrechnungen der Werte können dem Anhang A.2 ent-

nommen werden.

In der Umrechnung der Verformungsmoduln werden mehrere Ansätze berücksichtigt und verglichen. Die verwendeten Umrechnungsansätze werden hier noch einmal aufgelistet.

$$E_{v1} \geq 25 \text{ MN/m}^2 \text{ mit } E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} \cdot E_{v1} \quad (5.1)$$

$$E_{v1} \leq 25 \text{ MN/m}^2 \text{ mit } E_{vd} = \frac{6}{5} \cdot E_{v1} \quad (5.2)$$

$$E_{v2} = 2 \cdot E_{vd} \quad (5.3)$$

5.7 Vergleich zwischen Labor- und Messergebnisse

Um einen Vergleichswert zwischen Labor und Feldmessungen zu erhalten, wurden wie in Abschnitt 4.4 erwähnt zwei Kompressionsversuche (HuO und MuA) durchgeführt. Diese Ergebnisse werden laut den Umrechnungsansätzen 5.1, 5.2, und 5.3 umgerechnet und für Vergleiche herangezogen. Die Umrechnungswerte werden nur mit den Messreihen verglichen, von denen die entnommenen Probe stammen. Aus dem Vergleich der Einbaudichten zwischen Proctor- und Kompressionsversuchen (siehe Tabelle 4.6) wurde geschlossen, dass eine generelle Steigerung der Steifemoduln noch möglich wäre. Nachfolgende Vergleichswerte liegen also wahrscheinlich unter dem erreichbaren Maximum.

Die Bodenprobe für den Kompressionsversuch stammt vom oberen Teil (HuO) der Strecke. Für die Gegenüberstellung wird das Ergebnis dieser Referenzprobe des Ödometerversuches für die gesamte Strecke angesetzt. Wird die Trockendichte aus den Proctorversuchen (Abschnitt 4.5) der beiden Proben HuO und HuU verglichen, wird erkannt, dass die Probe HuU eine höhere Trockendichte erreicht als HuO. Deshalb wird hier der Vergleichswert von HuO für die gesamte Strecke herangezogen. Wäre ein Kompressionsversuch für die Probe (HuU) durchgeführt worden, so sollte dieser einen höheren Steifemodul erzielen. In der Tabelle 5.2 werden die Vergleichswerte für die Abbildungen 5.3 und 5.5 aufgelistet.

E_{vd}	Median (Feldmessungen)	Laborwert (E_{oed})	Mittelwert (Feldmessungen)
$E_{v1 \text{ (dyn)}} [\text{MN/m}^2]$	12.1	13.5	18.5
$E_{v2 \text{ (dyn)}} [\text{MN/m}^2]$	24.5	42.5	20.3

Tabelle 5.2: Vergleichswerte für HuO, (dyn) bezeichnet die umgerechneten Werte aus den Feldmessungen mit der dynamischen Lastplatte, (oed) sind die Versuchsergebnisse aus dem Kompressionsversuch im Labor;

Bei Betrachten der Ergebnisse der Abbildung 5.3 im Detail, können mehrere Erkenntnisse gezogen werden. Der Median (50 % aller Messwerte) für $E_{v1 \text{ (dyn)}}$ liegt mit $12,1 \text{ MN/m}^2$ leicht unter dem Laborwert des Kompressionsversuches E_{oed} ($13,5 \text{ MN/m}^2$). Folglich liegt mehr als die Hälfte der Messungen unter den Referenzwert aus dem Labor.

Wird die grüne Säule betrachtet, kann erkannt werden, dass diese Stelle nur die Hälfte (ca. 6 MN/m^2) des Laborwertes E_{oed} erreichen. Es ist anzunehmen, dass im gut verdichteten Zustand diese Stellen den Wert aus dem Laborversuch erreichen sollte, da das Material an dieser Stelle entnommen wurde und sich

daher nicht wesentlich unterscheidet. Die Differenz der Werte im Vergleich, kann auf unterschiedliche Dichten im Feld und Laborversuch vermutet werden.

Für eine weitere Gegenüberstellung mit den selben Daten wird als Vergleichswert der Wiederbelastungsmodul $E_{\text{oed } v2}$ aus dem Kompressionsversuch und die zu einen $E_{v2 \text{ (dyn)}}$ -Wert umgerechnete Messwerte herangezogen (siehe Abb. 5.5). Wird der Wert für $E_{\text{oed } v2}$ ($42,5 \text{ MN/m}^2$) mit dem Median $E_{v2 \text{ (dyn)}}$ ($24,5 \text{ MN/m}^2$) der umgerechneten Laborwerte ins Verhältnis gesetzt, so ergibt sich ein größerer Unterschied im Verhältnis aus den Vergleichswerten E_{v2} zwischen Labor und Feldmessungen.

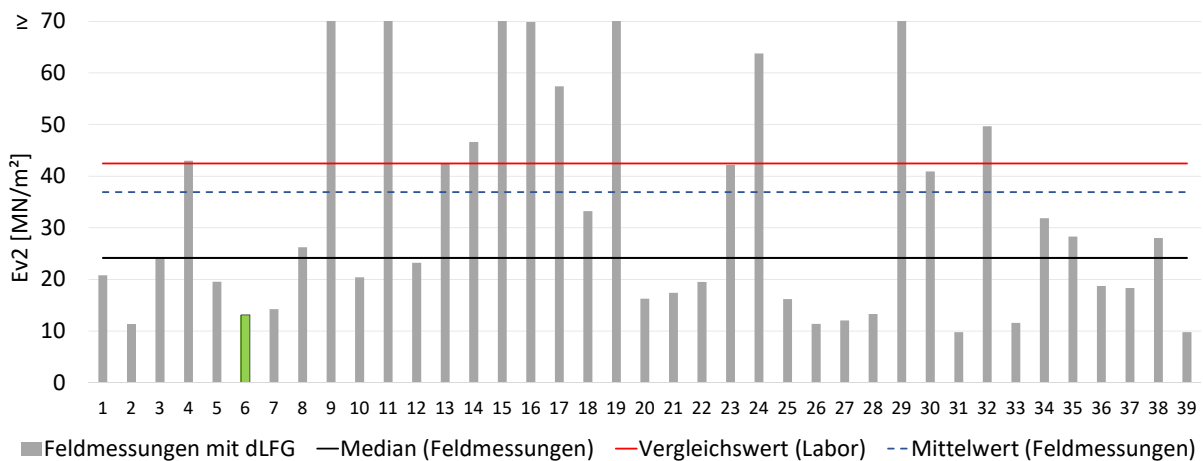


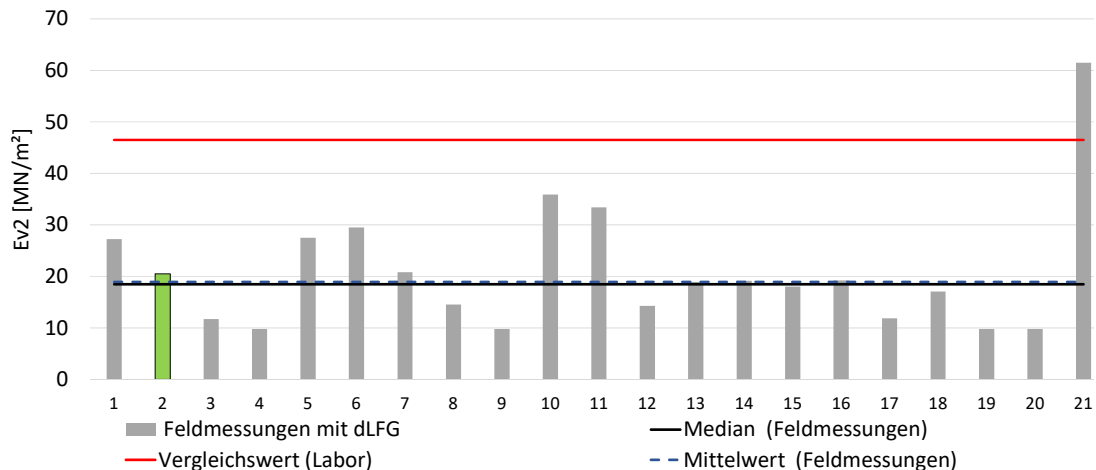
Abbildung 5.5: Werte für E_{v2} (HuO und HuU)
(Grüner Balken markiert die Messung in unmittelbarer Umgebung zur Entnahmestelle der Bodenprobe)

Die Tabelle 5.3 sind die Zahlenwerte für die Abbildungen 5.4 und 5.6 des Muttereralmtails aufgelistet. Auch für diese MTB-Strecke gilt, dass der Laborwert für E_{oed} ($13,3 \text{ MN/m}^2$) höher liegt als der Median ($9,2 \text{ MN/m}^2$). Hier ist der Unterschied zwischen dem Median und dem Laborwert kleiner als bei der vorher betrachteten Strecke (HuO und HuU). Wird allerdings die Stelle betrachtet, welche am nächsten zur Entnahmestelle liegt, so liegt dieser Wert ($10,3 \text{ MN/m}^2$) näher am Laborwert und auch über den Median.

E_{vd}	Median (Feldmessungen)	Laborwert (E_{oed})	Mittelwert (Feldmessungen)
$E_{v1 \text{ (dyn)}} [\text{MN/m}^2]$	9.2	13.3	9.5
$E_{v2 \text{ (dyn)}} [\text{MN/m}^2]$	18.5	46.5	18.9

Tabelle 5.3: Vergleichswerte für MuA , (dyn) bezeichnet die umgerechneten Werte aus den Feldmessungen mit der dynamischen Lastplatte, (oed) sind die Versuchsergebnisse aus dem Kompressionsversuch im Labor;

Aus der Gegenüberstellung der umgerechneten Werte für den Wiederbelastungsmodul E_{v2} (siehe Abb. 5.6) wird ersichtlich, dass die beiden Vergleichswerte um mehr als den Faktor zwei auseinander liegen. Der Vergleichswert für den E_{v2} liegt bei $46,5 \text{ MN/m}^2$ und der Median erreicht einen Wert von $18,5 \text{ MN/m}^2$.

Abbildung 5.6: Werte für E_{v2} (MuA)

(Grüner Balken markiert die Messung in unmittelbarer Umgebung zur Entnahmestelle der Bodenprobe)

Aus der Gegenüberstellung der Feldmessungen mit den Laborwerten der beiden Strecken, kann kein Unterschied der Verdichtungsqualität anhand dieser Daten erkannt werden. Die Bodenproben der beiden Strecken weisen ähnliche Kornverteilungen auf. Bei dem Vergleich der erzielten Trockendichten aus den Proctorversuchen, liegen jene von MuA deutlich unter denen von HuO und HuU. Daraus lässt sich schließen, dass die Strecke (HuO und HuU) die besseren Voraussetzungen für eine gute Bodenverdichtung hatte als die MuA-Strecke. Es kann festgehalten werden, dass die Strecke (MuA) trotz schlechterer Voraussetzungen (geringe Trockendichte im Proctorversuchen) ähnliche Verformungsmoduln erreicht wie die Strecke (HuO und HuU). Daraus kann gefolgert werden, dass die MuA-Strecke besser verdichtet wurde. Für den Hungerburgtrail wäre eine Steigerung des Verdichtungsgrades anhand der hohen im Labor erzielten Trockendichte noch möglich. Der Hungerburgtail hat also mehr Potential zum weiteren Erhöhen der Verdichtung als der Muttereralmtrail.

Aus dem Verhältnis der Anzahl der erfolgten und fehlgeschlagenen Messungen für die Strecken geht hervor, dass Strecke MuA eine höhere Streuung und stellenweise niedriger Messwerte im direkten Vergleich erzielt zur Strecke (HuO und HuU). So sind für die MuA-Strecke 4 von 21 Messungen fehlgeschlagen, aufgrund zu geringen Verformungsmoduln ($\leq 5 \text{ MN/m}^2$). Im Gegensatz dazu, waren für die Strecke (HuO und HuU) alle 39 Messungen erfolgreich.

5.8 Vergleich Doppelmessungen

An zwei Strecken wurden zweimal an denselben Punkten zu unterschiedlichen Zeitpunkten Verformungsmessungen vorgenommen. Diese wurden mit Hilfe von Markierungen vor Ort, Aufnahme von Fotos und Aufzeichnung der GPS-Koordinaten durch den Messcomputer der dynamische Lastplatte dokumentiert. Für die nachfolgenden Vergleiche werden nur identische Stellen betrachtet. Es ist von einer Positionsgenauigkeit von unter einem Meter auszugehen.

In Abbildung 5.7 wurde für HuO die erste Messreihe (blauen Säulen) zu Beginn und die zweite Messreihe (grauen Säulen) am Ende des Sommer 2018 durchgeführt. Vor der ersten Messung auf der Strecke (HuO), hatte es am Vortag geregnet und es war ein leicht feuchter Boden anzutreffen. Bei der zweiten Aufnahme der Verformungsmoduln, war vorher zwei Wochen schönes Wetter ohne Regen.

Der Vergleich der Messwerte zeigt, dass die zweite Messreihe niedrigere dynamische Verformungsmoduln liefert als die Erste. An dem Median und dem Mittelwert kann dieser Trend ebenfalls abgelesen werden. Grund dafür ist sicher die Trockenperiode vor der zweiten Messung. Es kann daraus gefolgert werden,

dass die Messwerte der Verformungsmoduln über die Zeit nicht konstant und abhängig von Umwelteinflüssen und der Beanspruchung aus den Überfahrten mit MTB veränderlich sind.

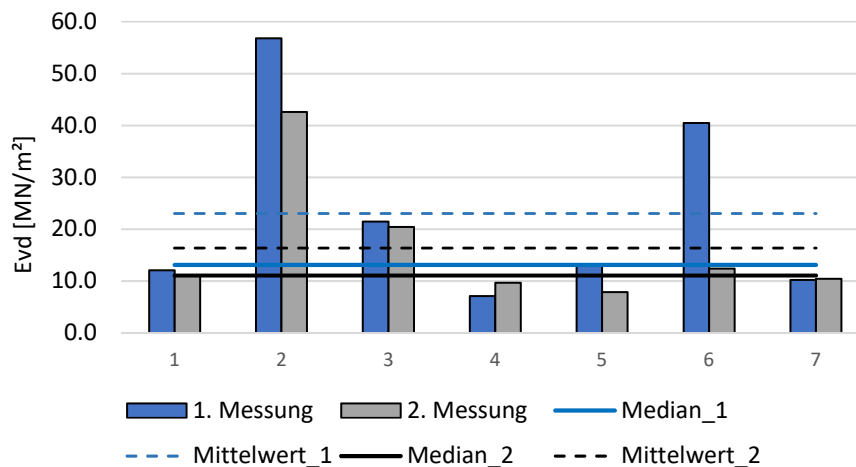


Abbildung 5.7: Doppelmessung zu verschiedenen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Wetterverhältnissen (HuO)

Die zweite Doppelmessung wurde an einem neu errichteten MTB-Strecke in Serfaus-Fiss-Ladis (SFL) durchgeführt. Vor der ersten Messreihe wurde eine Verdichtung des Bodens vorgenommen. Die zweite Messserie erfolgte nach erneutem Verdichten des Bodens nach einem regenreichen Tag. In der Abbildung 5.8 kann eindeutig erkannt werden, dass nach erneutem Verdichten im feuchten Zustand der Boden tendenziell höhere Verformungsmoduln aufweist, folglich eine höhere Trockendichte. Es kann festgestellt werden, dass die Verdichtung gut erkennbar und mit der dynamischen Lastplatte auch messbar ist.

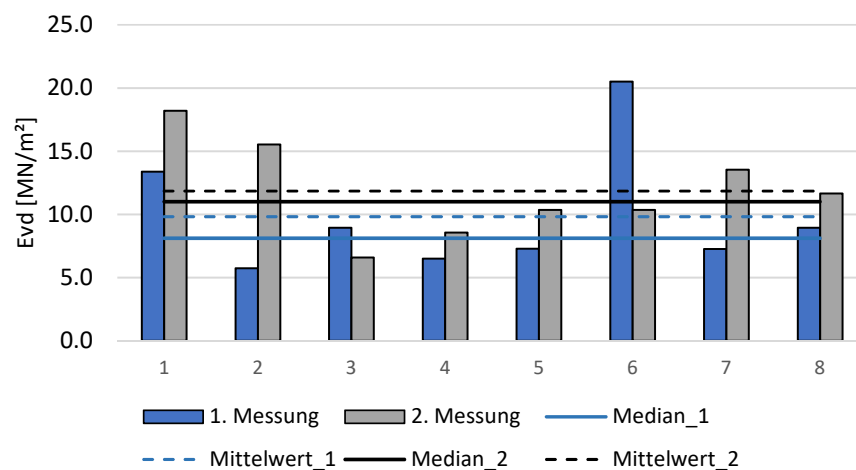


Abbildung 5.8: Doppelmessung nach erneutem Verdichten (SFL)

5.9 Anforderungen bei Verdichtungskontrollen mittels der dynamischen Lastplatte

Werden alle Medianwerte aus der Abbildung 5.1 betrachtet, wird ersichtlich, dass bei den stärkeren verdichteten Strecken der Median tendenziell deutlich höher liegt als bei weniger stark verdichteten.

Die Mediane der verdichteten Strecken erreichen alle einen dynamischen Verformungsmodul E_{vd} von mindesten 10 MN/m^2 . Strecken, welche zum Teil aus Fremdmaterial bestehen, erreichen sogar Median-Werte bis 50 MN/m^2 .

Bei den verschiedenen Messreihen, wurden immer wieder Messungen auf angrenzenden und kreuzenden Forstwegen aufgenommen. Diese Messwerte liegen meistens in oberen Quartil-Bereich der statistischen Auswertung. Der Medianwert wird von den Messwerten an kreuzenden Forstwegen fast immer überschritten. Diese Messungen erreichen teilweise den doppelten Wert wie der Median für dieselbe Strecke. Es kann daraus gefolgert werden, dass eine Steigerung der vorhanden Verformungsmoduln durchaus möglich ist.

Die Steifemodule aus den Kompressionsversuchen, konnten für den Erstbelastungsmodul E_{v1} auch einen Wert über 10 MN/m^2 liefern. Es wird hier noch einmal in Erinnerung gerufen, dass die eingebauten Trockendichten der Kompressionsversuche unter den optimalen Proctordichten lagen. Folglich können die Steifigkeitsmodule aus den Kompressionsversuchen wahrscheinlich auch noch gesteigert werden und dadurch höhere Werte erreichen.

Werden die Mindestanforderungen in der Tabelle 5.4 für den E_{v1} mit einem Wert $10 - 15 \text{ MN/m}^2$ festgelegt, ergibt sich für E_{vd} ein Wert von ungefähr 20 MN/m^2 . Wird aus der Tabelle 5.5 der Richtwert für gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil von 15% bis zu 40% entnommen, so wird dieser ebenfalls mit $\geq 20 \text{ MN/m}^2$ angegeben.

Statischer Lastplattenversuch E_{v1}	Dynamischer Lastplattenversuch E_{vd}	
Erstbelastungs- modul E_{v1} [MN/m^2]	Dynamischer Verformungsmodul E_{vd} [MN/m^2]	
	nichtbindig	bindig
0	0	10
5	6	14
7,5	9	16
10	12	18
15	18	22
20	24	26
25	30	30
30	34	
35	38	
40	42	
45	46	
50	50	
55	54	
60	58	
65	62	
70	66	
75	70	
80	74	
85	78	
90	82	

Tabelle 5.4: Umrechnung der Mindestanforderungen von E_{vd} nach E_{v2} laut RVS.08.03.04

Werden diese Erkenntnisse zusammengefasst so könnte ein Richtwert für den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} von verdichteten natürlichen Böden zwischen $15-20 \text{ MN/m}^2$ angesetzt werden. Der Median für gut verdichtete Böden, mit entsprechenden Körnungslinien und geeigneten Verdichtungsge-

Richtwerte für die Zuordnung vom statischen Verformungsmodul E_2 oder dem Dynamischen Verformungsmodul E_{vd} zum Verdichtungsgrad D_{pr} bei grobkörnigen Bodengruppen			
	Geforderte Verdichtung in verschiedenen Tiefenlagen (ZTVT-StB 95*) (ZTVE-StB 94)	Anlehnung an Richtwerte für die Zuordnung zu D_{pr} (ZTVE-StB 84 Tab. 8)	1) Vorschlag für die Zuordnung von E_{vd} zu E_2 (gem. ZTV-E StB, Stand Okt. 09)
Bodengruppe DIN 18 196	Verdichtungsgrad D_{pr} in %	Verformungsmodul E_2 in MN/m ²	Verformungsmodul E_{vd} in MN/m ²
Kiese und Sande mit ≤ 7 Gew.-% $< 0,063$ mm (GW, GI, GT, GU)	≥ 103 ≥ 100 ≥ 98 ≥ 97	≥ 120 ≥ 100 ≥ 80 ≥ 70	≥ 65 ≥ 50 ≥ 40 ≥ 35
Enggestufte Kiese und Sande weitgestufte und intermittierende Sande (GE, SE, SW, SI)	≥ 100 ≥ 98 ≥ 97	≥ 80 ≥ 70 ≥ 60	≥ 40 ≥ 35 ≥ 32
Gemischtkörnige Kiese und Sande mit 7-15 Gew.-% $< 0,063$ mm (GU, GT, SU, ST)	≥ 100 ≥ 97	≥ 70 ≥ 45	≥ 35 ≥ 25
Schluffige und tonige sowie gemischtkörnige Böden 15-40 Gew.-% $< 0,063$ mm (U, T, GU, GT, SU, ST)	≥ 97 ≥ 95	≥ 45 ≥ 30	≥ 25 ≥ 20

Tabelle 5.5: Richtwerte für den Nachweis der erreichten Verdichtungen gem. ZTV E-StB 09 Abs. 14.2.5 bzw. ZTV E-StB 12

rät müsste einen Mindestwert von ≥ 15 MN/m² erreichen können. Somit sollten alle Messwerte diesen Wert überschreiten.

Diese Empfehlung basiert nur auf den vorliegenden Daten. Für eine Festlegung eines spezifischen Wertes müssen noch mehrere Untersuchungen durchgeführt werden. Die Menge an Messdaten ist zu gering, die Beanspruchung an die Tragschichten nicht bekannt und die Korrelationen der Verformungs- und Steifemoduln ungenügend berücksichtigt worden. Dennoch kann angenommen werden, dass bei E_{vd} -Werten von gemischtkörnigen Böden eine Untergrenze von 15- 20 MN/m² plausibel ist, vergleiche Tab. 5.4.

5.10 Ergebnisse und Erkenntnisse

Dieses Unterkapitel zeigt eine Aufnahme der Verdichtungsgrade und der Qualität der Verdichtung an den untersuchten MTB-Strecken auf. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Steigerung der vorhanden Verformungsmoduln der Strecken durchaus möglich ist.

Diese Erkenntnis beruht zum Einen aus den direkten Vergleichen zwischen den Ergebnissen aus den Labor- und Feldmessungen. Als zweites Argument, kann die Bandbreite an aufgezeichneten Messwerten herangezogen werden. Es liegen Messergebnisse mit einem 2- bis 10- fachen des Medianwertes vor. Aus der Analyse der Kornverteilungen ging hervor, dass die Kornverteilungskurven für 11er, HuO, MuA und DP sehr ähnlich verlaufen. Betrachtet man jedoch den geringsten Median-Wert (5,1 MN/m²) und den höchsten Median (54,9 MN/m²) so liegt ein Faktor von 10 zwischen diesen beiden Werten. Das lässt ebenfalls auf eine weitere Steigerung der Verformungsmoduln schließen.

Die aus Fremdmaterial bestehenden MTB-Strecken liefern höhere Messergebnisse für die dynamischen Lastplatte. Aus den Doppelmessungen kann erkannt werden, dass die erneute Verdichtung durchaus eine

Steigerung der Verformungsmoduln mit sich bringt. Auch kann aus der Doppelmessung erkannt werden, dass das Wasser nicht nur bei der Errichtung von MTB-Strecken von großer Bedeutung ist sondern auch während des Betriebes. So wird empfohlen Bewässerungsmaßnahme bei längeren Trockenperioden in Betracht zu ziehen. Durch eine Bewässerung kann voraussichtlich die Dauerhaftigkeit einer Strecke verlängert werden.

Der Richtwert stellt eine erste Empfehlung für einem Mindestwert an den Verformungsmodul bei Kontrollmessungen mittels dynamischer Lastplatte dar. Die Bandbreite an gemessenen Verformungsmoduln und die Untersuchungen im Labor zeigt jedoch, dass eine Steigerung der Verdichtung für diese Böden sicherlich möglich wäre. Es liegen teilweise sehr hohe Ergebnisse für einzelne Messungen vor, obwohl keine besonderen Verdichtungsmaßnahmen getroffen wurden. Geeignete Maßnahmen (z.B. Hinzugabe von Wasser) können eine Steigerung der Verdichtungsgrade und dadurch steifere Böden erzielen. Auch kann festgehalten werden das der Verformungsmodul keine Bodenkonstante ist, sondern sich abhängig von äußeren Einflüssen ändert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Zusammenfassung fokussiert sich auf den Ergebnissen der Laborversuche an den Bodenproben (Kapitel 4) und der Messergebnissen mit der dynamische Lastplatte (Kapitel 5). Hier werden nur die wichtigsten Erkenntnisse rekapituliert, eine detailliertere Zusammenfassungen befinden sich am Ende eines jeden einzelnen Abschnittes in den genannten Kapiteln.

- **Ergebnisse zu den Klassifikationen der Bodenproben**

Die entnommenen Bodenproben weisen alle einen weitgestuften Körnungsverlauf auf und werden der gemischtkörnigen Bodengruppe zugeordnet. Zwischen den vier Proben aus natürlich gewachsenen Böden und der Bodenprobe aus Fremdmaterial kann kein signifikanter Unterschied im Verlauf der Körnungslinien festgestellt werden. Alle fünf Böden besitzen gute Grundvoraussetzungen zum Erreichen eines hohen Verdichtungsgrades.

- **Erkenntnisse zur Verdichtbarkeit der Bodenproben**

Ein geeigneter Wassergehalt des Bodens beim Einbau ist wichtig zum Erreichen einer möglichst hohen Trockendichte. Der optimale Wassergehalt für eine gute Verdichtbarkeit sollte für die vorliegenden Böden zwischen 10 - 15% liegen. Dies wurde anhand der Proctor-Versuche belegt. Ist der Wassergehalt in diesem Bereich, so können die Bodenproben auf mindestens 95 % ihrer maximalen Proctordichte verdichtet werden. Die Bodenprobe aus dem Fremdmaterial (DP) erreicht die höchste optimale Trockendichte alle im Labor untersuchten Böden.

Als anschauliches Beispiel kann folgende Empfehlung für den Wassergehalt gemacht werden. Für einen 1 m breiten und 10 cm tief zu verdichteten MTB-Strecke, sollte 10 Liter Wasser (ca. 1 Gießkanne mit 10 Liter) pro Laufmeter eingebracht werden. Das würde bedeuten, dass pro Kubik 1 m³ Erdmaterial ungefähr 100 Liter Wasser benötigt wird um einen Wassergehalt von 10% zu erreichen.

Einen weiteren Einfluss auf die Verdichtungsqualität hat der Anteil an organischen Bestandteilen. Mit steigendem organischen Anteil sinkt die maximale erreichbare optimale Trockendichte. Zusätzlich steigt der Bedarf an Wasser, welcher zum Verdichten benötigt wird. Das Abtragen der obersten Deckschicht (Humus) von natürlichen Böden, sowie das Entfernen von auffälligen organischen Bestandteilen sind geeignete Maßnahmen zur Reduktion der organischen Bestandteile.

- **Erkenntnisse aus der Analyse der Verformungsmessungen mit der dynamischen Lastplatte**

Die Qualität der Verdichtung entlang der Stecken variiert stark und eine Steigerung des Verdichtungsgrades ist durchaus möglich. Dies wird von den Laboruntersuchungen und den Messungen auf Forst- und Wanderwegen bestätigt. Auch die Mindestanforderungen an den Verdichtungsgrad aus dem Straßenbau geben höhere Verdichtungen an.

Besonders stark verdichtete MTB-Strecken weisen einen deutlich höheren Verformungsmodul als weniger stark verdichtete Strecken auf.

Im Zuge von zeitlich versetzten Doppelmessungen mit der dynamischen Lastplatte wurde festgestellt, dass der Wassergehalt auch einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der MTB-Strecken hat. Sofern möglich, ist es empfehlenswert bei längeren Trockenperioden die Strecke künstlich zu bewässern. Trocknet die verdichtete Tragschicht stark aus, verringert sich durch die dynamischen Belastungen aus den MTB-Überfahrten der Verformungsmodul. Dadurch werden größere lokale Verformungen an den MTB-Strecken begünstigt (Brems- und Spurrillenbildung).

Eine Steigerung des mit der dynamischen Lastplatte gemessenen Verformungsmoduls nach Aufbringen von Verdichtungsarbeit ist messbar.

- **Vorschlag für Anforderungen an den dynamischen Verformungsmodul bei Verdichtungskontrollen**

Im Rahmen der Analysen und Vergleiche wird hier eine Empfehlung für einen Richtwert für die Verdichtungsüberprüfung gegeben. Der angestrebte mittlere Verformungsmodul sollte bei 20 MN/m² liegen, ein Mindestwert von 15 MN/m² sollte jedoch für alle Messungen an gut verdichteten Strecken erreicht werden können.

6.2 Anmerkungen zur Arbeit

Im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit traten neue Fragen auf, so sind bisher z.B. der Einfluss von Wurzelsystemen von Bäume auf die Standfestigkeit des Bodens unberücksichtigt geblieben.

Für die genaue Festlegung von Kriterien zur Überprüfung der Verdichtungsqualität im Feld anhand der dynamischen Lastplatte, sollte die Korrelation zwischen den Verformungsmoduln von statischen und dynamischen Lastplattenversuchen und den Kompressionsversuchen noch weiter erforscht werden. Ein statischer Lastplattenversuch auf einer MTB-Strecke, oder in unmittelbarer Umgebung (z.B. auf einem kreuzenden Forstweg) wäre zu empfehlen.

Um einen weiteren Einblick der vorhandenen Verdichtungsqualität an den MTB-Strecken zu bekommen, sollten zum Vergleich auch die Dichten im Feld gemessen werden.

6.3 Weitere Forschungsfragen

Für weiterführende Verbesserungsmaßnahmen der Verdichtung von MTB-Strecken werden folgende Untersuchungen empfohlen.

- Untersuchungen zur Verbesserung der Verdichtbarkeit und Standfestigkeit von Trag- und Deckschichten für MTB-Strecken im Zusammenhang mit dem Schichtaufbau und der Zusammensetzung des Materials. Eine Modifizierung der Kornverteilungslinie durch eine Beimischung von Schotter oder durch das Entnehmen von Feinkorn könnte eine weitere Steigerung der Trockendichte mit sich bringen.
Zudem könnte ein Zwei-Schichten-Aufbau wie es im Straßenbau Standard ist eine Möglichkeit der Verbesserung sein.

- Untersuchungen bezüglich der Beanspruchung einer Tragschicht durch Fahrräder, mit Fokus auf die Schubkräfte, welche besonders aus der Bremswirkung der Räder auf den Boden resultieren. Durch eine genaue Kenntnis der Beanspruchung, könnten die Kriterien an den MTB-Streckenaufbau für eine ausreichende Verdichtung besser definiert werden.
- Im Gegensatz zur oben erwähnten negativen Beanspruchung durch die Fahrräder, könnten diese auch umgekehrt einen positiven Beitrag zur Verdichtung leisten. Da oft bei der Benutzung der Strecken durch Fahrräder ideale Verdichtungsbedingungen vorherrschen (feuchter Boden), könnten durch die Belastung und hohe Frequenzen beim normalen Befahren die Strecke zusätzlich verdichtet werden.
- Untersuchungen der erreichbaren Verdichtungsgrade mit verschiedenen mobilen Verdichtungsgeräten für den Trailbau sind ebenfalls von Interesse.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Boden als Dreistoffgemisch (Modellvorstellung)	3
2.2	Bestandteile von Boden	3
2.3	Damm und Einschnitt im Gelände	6
2.4	Bereichsgrenzen für rolliges und bindiges Verhalten	7
2.5	Druck-Setzungs-Kurve	8
2.6	Seitliche Ausdehnung des Bodens ist behindert	8
2.7	Einfluss von Trockendichte und Wassergehalt auf den Verformungsmodul	9
2.8	Beziehung zwischen Proctordichte und Verformungsmodul	10
3.1	Charakteristischer Durchmesser zur Korngrößenbestimmung	13
3.2	Beispiele für Körnungslinien typischer Bodenarten	14
3.3	Siebturm	16
3.4	Sedimentationsanalyse	17
3.5	Automatischer Proctorhammer	19
3.6	Proctorkurven für verschiedene Bodenarten mit zugehöriger Sättigungslinie (Abbildung in Anlehnung an [4])	20
3.7	Verdichtungskurven des Proctorversuches	21
3.8	Seitliche Ausdehnung des Bodens ist verhindert	22
3.9	Ödometer mit eingespannter Probe	22
3.10	Glühofen	23
3.11	Prinzipskizze des dynamischen LFG	24
3.12	Equipment bei den Feldmessungen	25
3.13	Verschiebung und Arbeitsdiagramm der dynamischen Lastplatte	26
4.1	Bodenproben für Laboruntersuchungen	30
4.2	Kornverteilungslinien aller untersuchten Bodenproben	33
4.3	Bereichsgrenzen für rolliges und bindiges Verhalten mit Sieblinien der Bodenproben	35
4.4	Auswertung einer Proctorkurve im Detail	36
4.5	Gegenüberstellung aller Proctorkurven der untersuchten Bodenproben	37
4.6	Gegenüberstellung von Proctorkurven aus Labor mit Literatur	39
4.7	Wassergehaltsgrenzen für Proctordichten	40
4.8	Darstellung der Drucksetzungskurve für HuO aus dem Kompressionsversuch	41
4.9	Darstellung der Drucksetzungskurve für MuA aus dem Kompressionsversuch	41
5.1	Übersicht aller Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte	44
5.2	Detaillierte Übersicht der Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte.; der horizontale Strich markiert den Median, x markiert den Mittelwert, die Box markiert das untere und obere Quartil (50% der Werte), die oberen und unteren Linien markieren den 1,5-fache Interquartilsabstand, Punkte außerhalb stellen Extremwerte dar;	46
5.3	Messergebnisse für E_{vd} mit der dynamischen LFG (HuO und HuU)	47

5.4	Umgerechnete Werte für E_{vd} (HuO und HuU)	47
5.5	Werte für E_{v2} (HuO und HuU)	50
5.6	Werte für E_{v2} (MuA)	51
5.7	Doppelmessung zu verschiedenen Zeitpunkten	52
5.8	Doppelmessung nach erneuten Verdichten	52

Tabellenverzeichnis

3.1	Ausschnitt aus Tabelle A1 Bodenklassifikation	12
3.2	Korngrößenbereiche laut ÖNORM B4400	12
3.3	Maschenweite der Siebe	15
3.4	Bezeichnungen für organische Massenanteile	16
4.1	Entnahme der Bodenproben für Laboruntersuchungen	30
4.2	Bestimmungsparameter und Klassifikation laut ÖNORM B4400	34
4.3	Trockendichten und zugehörige Wassergehalte für die Bodenproben	38
4.4	Versuchswerte und Steifemoduln (HuO) (Entlastungmoduln sind nicht angegeben)	42
4.5	Versuchswerte und Steifemoduln (MuA) (Entlastungmoduln sind nicht angegeben)	42
4.6	Gegenüberstellung der Dichten aus Proctorversuchen und Ödometerversuchen	42
5.1	Übersicht der statistischen Auswertungen der Messergebnisse mit der dynamischen Lastplatte. Die Zahl in der Klammer gibt die Anzahl der berücksichtigten Messergebnisse in der statistischen Auswertung wieder.	45
5.2	Vergleichswerte für HuO, (dyn) bezeichnet die umgerechneten Werte aus den Feldmessungen mit der dynamischen Lastplatte, (oed) sind die Versuchsergebnisse aus dem Kompressionsversuch im Labor;	49
5.3	Vergleichswerte für MuA, (dyn) bezeichnet die umgerechneten Werte aus den Feldmessungen mit der dynamischen Lastplatte, (oed) sind die Versuchsergebnisse aus dem Kompressionsversuch im Labor;	50
5.4	Umrechnung der Mindestanforderungen von E_{vd} nach E_{v2}	53
5.5	Richtwerte für den Nachweis der erreichten Verdichtungen	54

Literaturverzeichnis

- [1] Lars Lotze, Dieter Stöhr, Günther Zimmermann. *Trailbauhandbuch: Im Rahmen des Tiroler MTB Modells 2.0*. Amt der Tiroler Landesregierung Gruppe Forst, Innsbruck and Bürgerstraße 36 6020, April 2018.
- [2] Kerstin Lesny and Eugen Perau. *Bodenmechanisches Praktikum: Auswahl und Anwendung bodenmechanischer Laborversuche*. Berichte aus dem Bauwesen. Shaker, Herzogenrath, 1. aufl. edition, 2015.
- [3] Dimitrios Kolymbas. *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3., neu bearb. aufl. edition, 2011.
- [4] Peter Dietz. *Walderschließung: Ein Lehrbuch für Studium u. Praxis unter bes. Berücksichtigung d. Waldwegebaus*. Von Peter Dietz, Wolfgang Knigge, Hans Löffler. Parey, Hamburg & Berlin, 1984.
- [5] Wolfgang Fellin. *Bodenmechanik und Grundbau 1: Übungen*. PhD thesis, *Arbeitsbereich Geotechnik und Tunnelbau, Institut für Infrastruktur, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Innsbruck, Innsbruck, 24. Juli 2014.
- [6] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. Arbeitsausschuss Erd- und Felsarbeiten. *Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau*. FGSV. FGSV-Verlag, 2003.
- [7] Helmut Prinz and Roland Strauß. *Ingenieurgeologie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 6. aufl. 2018 edition, 2018.
- [8] Karl Josef Witt. *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1 und Teil 2: Geotechnische Grundlagen*. Grundbau-Taschenbuch Ser. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, Newark, 2017.
- [9] Carsten Karcher. *Straßenbau und Straßenerhaltung: Ein Handbuch für Studium und Praxis*. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, Berlin, 10th ed. edition, 2016.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Er- und Grundbau, editor. *Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau*. FGSV Verlag GmbH, Köln, 2003.
- [11] TERRATEST GmbH. Handbuch: Leichtes fallgewichtsgesetz für den dynamischen lastplattendruckversuch: „terratest 4000 usb“.
- [12] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr. Rvs 08.03.04 verdichtungsnachweis mittels dynamischen lastplattenversuches, 1. März 2008.
- [13] Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz KOPF, Univ.DoZ. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar ADAM, Dipl.-Ing. Ivan PAULMICHL. *Untersuchungen des dynamischen Lastplattenversuches mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz unter Verwendung der Randelementmethode*. PhD thesis, 2003.
- [14] Sirko Lehmann. *Untersuchung zur Korrelation zwischen statischen und dynamischen Plattenversuchen: Bachelorarbeit an der Technischen Universität Darmstadt*. PhD thesis, Fachbereich 13 Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2011.
- [15] *Erd- und Grundbau: Normen*, volume 36 of *DIN-Taschenbuch*. Beuth, Berlin, 7. aufl., stand d. abgedr. normen: 31. mai 1986 edition, 1986.
- [16] Jakob Poppeller. *Verdichtungsprüfung von Mountainbiketrails mittels dynamischer Lastplatte*. PhD thesis, Fakultät für technische Wissenschaften, Innsbruck, 11. November 2018.

A Anhang

A.1 Protokolle der Laborversuche

A.1.1 Protokolle der Sieb- und Schlämmanalysen

Einbauprotokoll für Korngrößenverteilung ÖNORM B 4412

PROJEKT	NTB - Verdichtung	LABOR NR.	2791
PROJEKT NR.	18142	AUFTRAGG.-BEZ.	
VERSUCHSDATUM	24.01.2019	ENTN.-STELLE	MuA
BEARBEITER/IN	NS	ENTNAHMETIEFE	0-40 cm

Nasses Abtrennen: kleiner 0.125 [mm] (Probe A1)		(12) Sedimentation (Probe B)			
Behälter Nr.		Behälter Nr.	18	Korndichte [g/cm³]	
mt + mb [g]		mt + mb [g]	424,36	Aräometer	2
mb [g]		mb [g]	374	Dispergierungsmittel	DISV
mt [g]	2647	mt [g]	50,36	Zahl 20	

Siebung größer 0.125 [mm] (Probe A2)			Sedimentation (Probe B)		Startzeit	858	24.01.19
Maschenweite [mm]	Siebrückstände [g]		Stunden	Minuten	Sekunden	T (°C)	Ablesung R'
Anfangseinwaage [g]	4467				30	19,2	25,5
63	—			1		19,2	23
31.5	358			2		19,2	79,5
16	287			5,3		19,2	137
8	138			15		19,3	9,8
4	208			45		19,5	5,7
2	344		2			19,6	3,2
1	457		4			19,7	1,7
0.5	550		24			20	0,2
0.25	625						
0.125	886						
(0.063)							
letzter Siebdurchgang	613						
Masse < 0.125 (Pr A1)							
Summe d. Rückstände							
Größtkorn [mm]	50						

(57)

7117g

Einbauprotokoll für Korngrößenverteilung ÖNORM B 4412

PROJEKT	MTB - Verdichtung	LABOR NR.	2792
PROJEKT NR.	18142	AUFTRAGG.-BEZ.	
VERSUCHSDATUM	24.01.2019	ENTN.-STELLE	Au 0
BEARBEITER/IN	MS	ENTNAHMETIEFE	0-40 cm

Nasses Abtrennen: kleiner 0.125 [mm] (Probe A1)		① Sedimentation (Probe B)			
Behälter Nr.		Behälter Nr.	9	Korndichte [g/cm³]	
mt + mb [g]		mt + mb [g]	422,48	Aräometer	2
mb [g]		mb [g]	377	Dispergierungsmittel	DISV
mt [g]	5116	mt [g]	45,43	Zylinder 1	

Siebung größer 0.125 [mm] (Probe A2)			Sedimentation (Probe B)		Startzeit	9:24	
Maschenweite [mm]	Siebrückstände [g]		Stunden	Minuten	Sekunden	T (°C)	Ablesung R'
Anfangseinwaage [g]	5754				30		21
63	409	✓		1		19,5	18
31.5	282	409		2		19,5	16,2
16	285	282		5		19,5	14,0
8	303	2		15		19,6	9,7
4	434	3		45		19,7	7,1
2	410		2			19,6	5,2
1	431		4			19,8	3,7
0.5	589		24			20,1	1,8
0.25	1627						
0.125							
(0.063)							
letzter Siebdurchgang	974						
Masse < 0.125 (Pr A1)							
Summe d. Rückstände							
Größtkorn [mm]	58						

18
(48) 10870 g

Einbauprotokoll für Korngrößenverteilung ÖNORM B 4412

PROJEKT	MTB - Verdichtung	LABOR NR.	2783
PROJEKT NR.	18/42	AUFTRAGG.-BEZ.	
VERSUCHSDATUM		ENTN.-STELLE	Hu 44
BEARBEITER/IN	MS	ENTNAHMETIEFE	0-40cm

Nasses Abtrennen: kleiner 0.125 [mm] (Probe A1)		(2) Sedimentation (Probe B)	
Behälter Nr.		Behälter Nr.	2
mt + mb [g]		mt + mb [g]	422,85
mb [g]		mb [g]	375
mt [g]	1940	mt [g]	47,85
		Korndichte [g/cm³]	
		Aräometer	2
		Dispergierungsmittel	DNS ✓

Siebung größer 0.125 [mm] (Probe A2)		Sedimentation (Probe B)		Startzeit	932	
Maschenweite [mm]	Siebrückstände [g]	Stunden	Minuten	Sekunden	T (°C)	Ablesung R'
Anfangseinwaage [g]	9460			30		20,5
63			1			18
31.5	656		2		18,3	13,8
16	668		5		18,3	6,8
8	553		15		18,4	4,8
4	442		45		18,5	3,7
2	343	2			18,6	2,6
1	424	4			18,8	1,7
0.5	1054	24			20,1	0,3
0.25	2788					
0.125	2351					
(0.063)						
letzter Siebdurchgang	176					
Masse < 0.125 (Pr A1)						
Summe d. Rückstände						
Größtkorn [mm]	58					

(93) 17400g

Einbauprotokoll für Korngrößenverteilung ÖNORM B 4412

PROJEKT	ITR - Verdichtung	LABOR NR.	2734
PROJEKT NR.	18142	AUFTRAGG.-BEZ.	
VERSUCHSDATUM		ENTN.-STELLE	11.01.11
BEARBEITER/IN	MS	ENTNAHMETIEFE	0 - 40 cm

Nasses Abtrennen: kleiner 0.125 [mm] (Probe A1)		Sedimentation (Probe B)			
Behälter Nr.		Behälter Nr.	12	Korndichte [g/cm³]	
mt + mb [g]		mt + mb [g]	445,93	Aräometer	2
mb [g]		mb [g]	377	Dispergierungsmittel	DIS V
mt [g]	2932	mt [g]	38,93	Zylinder 2	

Siebung größer 0.125 [mm] (Probe A2)			Sedimentation (Probe B)		Startzeit	9:50	
Maschenweite [mm]	Siebrückstände [g]		Stunden	Minuten	Sekunden	T (°C)	Ablesung R'
Anfangseinwaage [g]	6000				30	19,5	19,5
63				1		19,5	17,5
31.5	677			2		19,5	16,3
16	478			5		19,5	13,2
8	540			15		19,6	10,1
4	718			45		19,7	7,0
2	720		2			19,6	4,5
1	670		4			19,8	2,9
0.5	649		24			20,1	0,8
0.25	620						
0.125	632						
(0.063)							
letzter Siebdurchgang	235						
Masse < 0.125 (Pr A1)							
Summe d. Rückstände							
Größtkorn [mm]	60						

(44)

8932g

Einbauprotokoll für Korngrößenverteilung ÖNORM B 4412

PROJEKT	MTB-Verdichtung	LABOR NR.	2735
PROJEKT NR.	18142	AUFTRAGG.-BEZ.	
VERSUCHSDATUM		ENTN.-STELLE	DP
BEARBEITER/IN	NS	ENTNAHMETIEFE	0-40 cm

Nasses Abtrennen: kleiner 0.125 [mm] (Probe A1)		(18) Sedimentation (Probe B)			
Behälter Nr.		Behälter Nr.	66	Korndichte [g/cm³]	
mt + mb [g]		mt + mb [g]	332,48	Aräometer	2
mb [g]		mb [g]	286	Dispergierungsmittel	DIS V
mt [g]	3778	mt [g]	46,51	Zylinder 13	

Siebung größer 0.125 [mm] (Probe A2)			Sedimentation (Probe B)		Startzeit	10:13	
Maschenweite [mm]	Siebrückstände [g]		Stunden	Minuten	Sekunden	T (°C)	Ablesung R'
Anfangseinwaage [g]	6158				30	19,5	22
63				1		19,5	19,5
31.5	184			2		19,5	15,5
16	335			5		19,5	10,0
8	609			15		19,6	7,0
4	871			45		19,6	4,8
2	881		2			19,7	3,1
1	765		4			19,9	2,2
0.5	691		24			20,2	0,5
0.25	684						
0.125	801						
(0.063)							
letzter Siebdurchgang	325						
Masse < 0.125 (Pr A1)							
Summe d. Rückstände							
Größtkorn [mm]	38						

(40) 9933 g

A.1.2 Protokolle der Proctorversuche

Einbauprotokoll für Proctorversuch ÖNORM B 4418

PROJEKT	MTB - Verdichtung	LABOR NR.	2791
PROJEKT NR.	181/42	AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.	17/12/13	ENTNAHMESTELLE	Ruttenov Alm
BEARBEITER/IN	Mathias Steinmayr	ENTNAHMETIEFE	0 - 40 cm

Kübel Nr: 1/55

Proctor-Zylinder		Boden	
Ø _{Z, innen} [cm]	14,9	Bodenart	
Höhe h _Z [cm]	12,5		
Masse m _Z [g]	8812,0	Korndichte [g/cm³]	

Gesamtprobe			
Gesamtmasse [g]	12952	zul. Größtkorn [mm]	ÖN, Tab 2
Masse Überkorn [g]		Überkorn-Anteil [%]	ÖN, Tab 3

Versuchsdurchführung				
	O Standardproctor		O modifizierter Proctor	
Lagen	Schläge/Lage	Bärrmasse [kg]	Fallhöhe [m]	
3x	22	4,5	0,95	nach ÖN, Tab 1

Einbau und Dichten								
Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
m _F + m _Z [g]	11933	11983	12354	12608	12850	13027	13130	13083
Abstich [cm]	0	0	0	0	0	0	0	0

Wassergehalte								
Behälter-Nr.	C	C	103	240	0	51	20	13
m _F ' + m _B [g]	258,98	287,72	304,14	276,30	270,07	260,02	323,30	328,57
m _T ' + m _B [g]	258,98	276,38	282,73	255,28	245,20	232,86	284,92	288,22
m _B [g]	96,79	96,79	86,13	88,72	84,59	81,11	88,50	102,04

Einbauprotokoll für Proctorversuch ÖNORM B 4418

1502

PROJEKT	MTB-Trail Verdichtung	LABOR NR.	2792
PROJEKT NR.	18/42	AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	Hungerburg OSees
BEARBEITER/IN	Matthias Steinmayr	ENTNAHMETIEFE	0-40 cm

Kübel 18/43

Proctor-Zylinder		Boden	
Ø _{Z, innen} [cm]	14,9	Bodenart	
Höhe h _Z [cm]	12,5		
Masse m _Z [g]	8812,0	Korndichte [g/cm³]	

Gesamtprobe			
Gesamtmasse [g]	18534	zul. Größtkorn [mm]	ÖN, Tab 2
Masse Überkorn [g]		Überkorn-Anteil [%]	ÖN, Tab 3

Versuchsdurchführung				
	☒ Standardproctor		☐ modifizierter Proctor	
Lagen	Schläge/Lage	Bärmasse [kg]	Fallhöhe [m]	
3x	22	4,5	0,45	nach ÖN, Tab 1

Einbau und Dichten								
Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
m _F + m _Z [g]	12167	12531	12932	13135	13312	13275	13261	13229,0
Abstich [cm]	0	0	0	0	0	0	0	0

Wassergehalte								
Behälter-Nr.	46	46	103	240	0	47	13	C
m _F ' + m _B [g]	261,85	312,10	277,63	313,67	313,90	305,51	325,44	347,28
m _T ' + m _B [g]	261,85	301,27	285,85	288,78	285,13	274,24	290,45	304,92
m _B [g]	89,06	89,06	86,19	88,71	84,59	87,06	102,04	96,77

Einbauprotokoll für Proctorversuch ÖNORM B 4418

~ 10%

PROJEKT	MTB - Trail Verdichtung	LABOR NR.	2753
PROJEKT NR.	18142	AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	Hungerburg Unten
BEARBEITER/IN	Matthias Steinmayr	ENTNAHMETIEFE	0-40cm

Proctor-Zylinder		Boden	
Ø _Z , innen [cm]	14,3	Bodenart	
Höhe h _Z [cm]	12,5		
Masse m _Z [g]	8812,0	Korndichte [g/cm³]	

Gesamtprobe			
Gesamtmasse [g]	18251	zul. Größtkorn [mm]	ÖN, Tab 2
Masse Überkorn [g]	1197	Überkorn-Anteil [%]	ÖN, Tab 3

Versuchsdurchführung				
☒ Standardproctor		☐ modifizierter Proctor		
Lagen	Schläge/Lage	Bärrmasse [kg]	Fallhöhe [m]	
3x	22	4,5	0,45	nach ÖN, Tab 1

Einbau und Dichten								
Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
m _F + m _Z [g]	12838	12947	13121	13269	13333	13204	13101	
Abstich [cm]	0	0	0	0	0	0	0	

Wassergehalte								
Behälter-Nr.	41	41	42	240	47	0	103	
m _F ' + m _B [g]	370,35	298,26	321,10	330,32	343,50	364,65	365,83	
m _T ' + m _B [g]	370,35	287,86	305,68	309,87	317,72	335,87	330,35	
m _B [g]	86,29	86,29	84,21	88,71	87,06	84,59	86,19	

Einbauprotokoll für Proctorversuch ÖNORM B 4418

PROJEKT	ITB - Verdrichtung	LABOR NR.	2784
PROJEKT NR.	18/42	AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	Mer-Lift
BEARBEITER/IN	Rathias Steinmayr	ENTNAHMETIEFE	0-90 cm

57 / 44

Proctor-Zylinder		Boden	
Ø _{Z, innen} [cm]	14,9	Bodenart	
Höhe h _Z [cm]	12,5		
Masse m _Z [g]	8810,0	Korndichte [g/cm³]	

Gesamtprobe			
Gesamtmasse [g]	13813,0	zul. Größtkorn [mm]	ÖN, Tab 2
Masse Überkorn [g]	648,0	Überkorn-Anteil [%]	ÖN, Tab 3

14

Versuchsdurchführung				
	☒ Standardproctor		☐ modifizierter Proctor	
Lagen	Schläge/Lage	Bärmasse [kg]	Fallhöhe [m]	
3X	22	4,5	0,95	nach ÖN, Tab 1

Einbau und Dichten								
Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
m _F + m _Z [g]	12114	12163	12562	12811	12945	13132	13202	13150
Abstich [cm]	0	0	0	0	0	0	0	0

13093

Wassergehalte								
Behälter-Nr.	13	13	46	42	0	103	405	8
m _F ' + m _B [g]	304,82	280,20	288,58	261,77	294,26	246,16	290,31	322,68
m _T ' + m _B [g]	304,82	281,62	270,26	243,54	269,03	223,86	259,15	293,94
m _B [g]	102,04	102,04	89,07	84,21	84,59	86,19	88,41	100,14

47

363,05

313,88

87,07

Einbauprotokoll für Proctorversuch ÖNORM B 4418

PROJEKT	MTB- Verdichtung	LABOR NR.	2785
PROJEKT NR.	18/42	AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	Dilt Park
BEARBEITER/IN	Matthias Steinmayr	ENTNAHMETIEFE	0-90 cm

48/52

Proctor-Zylinder		Boden	
Ø _{Z, innen} [cm]	14,9	Bodenart	
Höhe h _Z [cm]	12,5		
Masse m _Z [g]	8810	Korndichte [g/cm³]	

Gesamtprobe			
Gesamtmasse [g]	17 128	zul. Größtkorn [mm]	ÖN, Tab 2
Masse Überkorn [g]	534	Überkorn-Anteil [%]	ÖN, Tab 3

8

Versuchsdurchführung				
☒ Standardproctor		☐ modifizierter Proctor		
Lagen	Schläge/Lage	Bärmasse [kg]	Fallhöhe [m]	
3x	22	4,5	0,45	nach ÖN, Tab 1

Einbau und Dichten								
Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
m _F + m _Z [g]	12934	13241	13669	13618	13545	13510		
Abstich [cm]	0	0	0	0	0	0		

Wassergehalte							
Behälter-Nr.	404	404	5	47	8	0	
m _F ' + m _B [g]	345,86	337,07	340,05	368,01	380,67	382,80	
m _T ' + m _B [g]	345,86	324,62	318,12	338,68	354,71	339,35	
m _B [g]	86,34	86,34	101,10	87,07	100,14	84,58	

A.1.3 Protokolle der Glühversuche

Einbauprotokoll für Glühverlust DIN 18128

PROJEKT	ITB - Verdichtung	LABOR NR.	2787
PROJEKT NR.	18/42	AG-BEZ.	
DATUM	28.01.2019	ENTNAHMESTELLE	17A/1
BEARBEITER(IN)	TS	TIEFE	0-40 cm

240	Probe 1 17A
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	255,18
m _B +m _T (g)	221,28
m _B (g)	88,71

48	Probe 2 17A
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	247,35
m _B +m _T (g)	212,53
m _B (g)	84,05

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	221,28
m _B +m _G (g)	212,89

17.35

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	212,53
m _B +m _G (g)	204,18

Probe 3	
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	
m _B +m _T (g)	
m _B (g)	

Probe 4	
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	
m _B +m _T (g)	
m _B (g)	

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	213,18
m _B +m _G (g)	212,82

10.40

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	204,50
m _B +m _G (g)	204,14

Mindestprobenmenge:

Bodenart	g
Organische, feinkörnige Böden	15
Sande	30
kiesiger Sand	200
Kies	1000

Einbauprotokoll für Glühverlust DIN 18128

PROJEKT	MTB - Verdichtung	LABOR NR.	2782
PROJEKT NR.	18/92	AG-BEZ.	
DATUM	29/01/15	ENTNAHMESTELLE	Hu 0
BEARBEITER(IN)	MS	TIEFE	0-40cm

47 Probe 1 Hu 0	
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	320,96
m _B +m _T (g)	311,22
m _B (g)	87,06

40 Probe 2 Hu 0	
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	317,57
m _B +m _T (g)	307,28
m _B (g)	84,57

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	311,22
m _B +m _G (g)	303,77

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	307,28
m _B +m _G (g)	298,97

Probe 3	
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	304,07
m _B +m _T (g)	
m _B (g)	303,84

Probe 4	
trocknen mit 105°	
m _B +m _F (g)	299,30
m _B +m _T (g)	
m _B (g)	298,89

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	
m _B +m _G (g)	

glühen mit 550 °	
m _B +m _T (g)	
m _B +m _G (g)	

Mindestprobenmenge:

Bodenart	g
Organische, feinkörnige Böden	15
Sande	30
kiesiger Sand	200
Kies	1000

Einbauprotokoll für Glühverlust DIN 18128

PROJEKT	MTB-Verdichtung	LABOR NR.	2783
PROJEKT NR.	18142	AG-BEZ.	
DATUM	21/02/18	ENTNAHMESTELLE	Hu Yu
BEARBEITER(IN)	MS	TIEFE	0-40

200	Probe 1	Hu Yu
trocknen mit 105°		
$m_B + m_F$ (g)	338,87	
$m_B + m_T$ (g)	331,17	
m_B (g)	88,16	

48	Probe 2	Hu Yu
trocknen mit 105°		
$m_B + m_F$ (g)	324,07	
$m_B + m_T$ (g)	316,50	
m_B (g)	84,05	

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	331,17
$m_B + m_G$ (g)	326,83

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	316,50
$m_B + m_G$ (g)	312,62

Probe 3	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	
$m_B + m_T$ (g)	
m_B (g)	

Probe 4	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	
$m_B + m_T$ (g)	
m_B (g)	

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	326,85
$m_B + m_G$ (g)	326,60

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	312,45
$m_B + m_G$ (g)	312,08

Mindestprobenmenge:

Bodenart	g
Organische, feinkörnige Böden	15
Sande	30
kiesiger Sand	200
Kies	1000

Einbauprotokoll für Glühverlust DIN 18128

PROJEKT	ITB - Verdichtung	LABOR NR.	
PROJEKT NR.	18/42	AG-BEZ.	
DATUM	25/02/19	ENTNAHMESTELLE	11e9
BEARBEITER(IN)		TIEFE	

44 Probe 1	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	271,77
$m_B + m_T$ (g)	238,27
m_B (g)	85,80

Probe 2 40	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	283,62
$m_B + m_T$ (g)	264,75
m_B (g)	83,01

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	238,27
$m_B + m_G$ (g)	227,54

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	264,75
$m_B + m_G$ (g)	252,17

Probe 3	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	227,71
$m_B + m_T$ (g)	
m_B (g)	

Probe 4	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	252,36
$m_B + m_T$ (g)	
m_B (g)	

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	
$m_B + m_G$ (g)	226,81

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	
$m_B + m_G$ (g)	251,26

Mindestprobenmenge:

Bodenart	g
Organische, feinkörnige Böden	15
Sande	30
kiesiger Sand	200
Kies	1000

Einbauprotokoll für Glühverlust DIN 18128

PROJEKT	18/42	LABOR NR.	
PROJEKT NR.		AG-BEZ.	
DATUM		ENTNAHMESTELLE	DP
BEARBEITER(IN)	MS	TIEFE	

Probe 1 41	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	342,20
$m_B + m_T$ (g)	340,08
m_B (g)	87,07

Probe 2 40	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	405,90
$m_B + m_T$ (g)	403,10
m_B (g)	84,65

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	333,41
$m_B + m_G$ (g)	

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	398,05
$m_B + m_G$ (g)	

Probe 3	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	
$m_B + m_T$ (g)	333,78
m_B (g)	

Probe 4	
trocknen mit 105°	
$m_B + m_F$ (g)	
$m_B + m_T$ (g)	398,53
m_B (g)	

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	
$m_B + m_G$ (g)	333,48

glühen mit 550 °	
$m_B + m_T$ (g)	397,77
$m_B + m_G$ (g)	

Mindestprobenmenge:

Bodenart	g
Organische, feinkörnige Böden	15
Sande	30
kiesiger Sand	200
Kies	1000

A.1.4 Protokolle der Kompressionsversuche

Einbauprotokoll für Kompressionsversuch ÖNORM B4420

PROJEKT	MTB - Verdichtung	LABOR NR.	
PROJEKT NR.	18/42	AUFTRGG-BEZ.	2782
VERSUCHSDAT.	18/02/1	ENTNAHMESTELLE	H40
BEARBEITER/IN	MS	ENTNAHMETIEFE	0-70cm

⑦

Gerät		Boden		
$\varnothing_{R, \text{innen}}$ [cm]	7,00	Bodenart		
Probenhöhe [cm]	1,9	Einbauart	gestört	ungestört
Masse Ring m_R [g]	81,5		0	0
Gerät-Nr.	2	Korndichte [g/cm ³]		

Versuchsdurchführung Zutreffendes ankreuzen!								
Laststufen [kN/m ²]		25	50	100	200	400	800	
1. Belastung		X	X	X	X	X		
Entlastung			X	X	X			
Wiederbelastung				X	X	X	X	
Zeitsetzung								

Probe: Ein- und Ausbau			
	Einbau	Ausbau	
$m_F + m_R$ [g]	221,94	$m_F + m_R$ [g]	207,93

Wassergehalte		
	Einbau	Ausbau
Behälter-Nr.	102	
$m_F' + m_B$ [g]	242,89	
$m_T' + m_B$ [g]	223,77	
m_B [g]	94,67	

9%

Institut für Infrastruktur

Arbeitsbereich Geotechnik und Tunnelbau

Versuchsprotokoll für Kompressionsversuch ÖNORM B4420

PROJEKT		LABOR NR.	
PROJEKT NR.		AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	
BEARBEITER/IN		ENTNAHMETIEFE	

Erstbelastung ☒ Entlastung ☐ Wiederbelastung ☐ 2. Entlastung ☐

1. Laststufe				2. Laststufe			
25 [kN/m²]				50 [kN/m²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
18/11/19 10.00		6	-0,080	18/11/19 08.27		6	-0,080 -0,210
		15	-0,080			15	-0,080 -0,215
		30	-0,085			30	-0,085 -0,220
		1	-0,100			1	-0,10 -0,225
		2	-0,105			2	-0,230
		5	-0,110			5	-0,240
		10	-0,115			10	-0,240
		30	-0,125			30	-0,250
	1		-0,130		1		-0,255
	2		-0,140		2		-0,260
	65.30		-0,145		63.40		-0,265
1 Tag	24.22		-0,160	1 Tag	24		

bitte wenden!

Labor Nr.

5

3. Laststufe 100 [kN/m ²]				4. Laststufe 400 [kN/m ²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
19/02/105		6	-0,355			6	0,77
		15	-0,370	21.2. 959		15	0,785
		30	-0,375			30	0,795
		1	-0,385			1	0,805
		2	-0,390			2	0,815
		5	-0,400			5	0,825
		10	-0,410			10 11	0,835
		30	-0,420			30	0,850
	1		-0,425		1		0,855
	2		-0,430		2		0,865
	6 5.30		-0,440		6		0,88
1 Tag	24 21,00		-0,455	22.2. 1 Tag 7.53	24		0,915
							0,920

4

5. Laststufe 200 [kN/m ²]				6. Laststufe [kN/m ²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
26/02/105		6	-0,545			6	
		15	-0,560			15	
		30	-0,570			30	
		1	-0,575			1	
		2	-0,585			2	
		5	-0,595			5	
		10	-0,600			10	
		30	-0,610			30	
	1		-0,620		1		
	2		-0,625		2		
	6 3		-0,630		6		
1 Tag	24 4		-0,630	1 Tag	24		
	6		-0,635				
			0,66				
			0,66				

Labor Nr.

3. Laststufe 200 [kN/m ²]				4. Laststufe 100 [kN/m ²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
08.55		6	0,855	19.12		6	0,83
		15	— " —			15	0,83
		30	0,850			30	0,83
		1	0,850			1	0,83
		2	0,850			2	0,83
		5	0,850			5	0,825
		10	0,850			10	0,825
		30	0,850			30	0,825
	1		0,850		1		0,825
	2		0,850		2		0,825
	6			25.2. 8 ³⁵	6		0,84
1 Tag	24			1 Tag	24		

5. Laststufe 50 [kN/m ²]				6. Laststufe [kN/m ²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
09.22		6	0,835			6	
		15	0,835			15	
		30	0,835			30	
		1	0,830			1	
		2	0,830			2	
		5	0,830			5	
		10	0,830			10	
		30	0,830			30	
	1		0,830		1		
	2				2		
	6				6		
1 Tag	24			1 Tag	24		

Institut für Infrastruktur

Arbeitsbereich Geotechnik und Tunnelbau

Versuchsprotokoll für Kompressionsversuch ÖNORM B4420

PROJEKT		LABOR NR.	
PROJEKT NR.		AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	
BEARBEITER/IN		ENTNAHMETIEFE	

Erstbelastung ☐ Entlastung ☐ Wiederbelastung ☒ 2. Entlastung ☐

1. Laststufe <u>100</u> [kN/m²]				2. Laststufe <u>200</u> [kN/m²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
<u>28/02/10,27</u>		6	<u>0,835</u>	<u>25/02 13.53</u>		6	<u>0,850</u>
		15	<u>0,835</u>			15	<u>0,855</u>
		30	<u>0,835</u>			30	<u>0,855</u>
		1	<u>0,840</u>			1	<u>0,855</u>
		2	<u>0,840</u>			2	<u>0,855</u>
		5	<u>0,840</u>			5	<u>0,855</u>
		10	<u>0,840</u>			10	<u>0,860</u>
		30	<u>0,840</u>			30	<u>0,860</u>
	1		<u>0,840</u>		1		<u>0,860</u>
	2		<u>0,840</u>		2		<u>0,860</u>
	<u>63 1/2</u>		<u>0,840</u>		<u>84</u>		<u>0,865</u>
<u>1 Tag</u>	24			<u>26.2 1 Tag</u>	24		<u>0,875</u>
				<u>8 29</u>			<u>0,880</u>
				<u>8 29</u>			

bitte wenden!

Labor Nr.

3. Laststufe 400 [kN/m²]				4. Laststufe 800 [kN/m²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
26/02/9.30		6	-0,900	27.2. 10 ¹⁴		6	0,995
		15	0,905			15	1,00
		30	0,905			30	1,005
		1	0,910			1	1,005
		2	0,910			2	1,01
		5	0,910			5	1,015
		10	0,910			10	1,015
		30	0,915			30	1,02
	1		0,920		1	6	1,03
	2		0,920		2		1,035
	6 5		0,930		6		1,04
27.2. 1 Tag 8 ¹⁴	24		0,95	28.2. Tag 9 ²⁴	24		1,07
9 ³⁵			0,95				1,075
				1.3. 8 ⁴⁸			1,09

5. Laststufe [kN/m²]				6. Laststufe [kN/m²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
		6		5.3. 11.00		6	1,130
		15		6.3. 08.30		15	1,135
		30		6.3. 17.30		30	1,135
		1		8.3. 08.45		1	1,135
		2				2	
		5				5	
		10				10	
		30				30	
	1				1		
	2				2		
	6				6		
1 Tag	24			1 Tag	24		

Einbauprotokoll für Kompressionsversuch ÖNORM B4420

PROJEKT	MTB- Verdichtung	LABOR NR.	
PROJEKT NR.	18/42	AUFTRGG-BEZ.	2791
VERSUCHSDAT.	18/02	ENTNAHMESTELLE	MuA
BEARBEITER/IN	MS	ENTNAHMETIEFE	0-40

72

Gerät		Boden		
Ø _{R, innen} [cm]	7,00	Bodenart		
Probenhöhe [cm]	1,9	Einbauart	gestört	ungestört
Masse Ring m _R [g]	81,5		0	0
Gerät-Nr.	1	Korndichte [g/cm³]		

Versuchsdurchführung Zutreffendes ankreuzen!							
Laststufen [kN/m²]		25	50	100	200	400	800
1. Belastung		X	X	X	X	X	
Entlastung			X	X	X		
Wiederbelastung				X	X	X	X
Zeitsetzung							

Probe: Ein- und Ausbau			
	Einbau	Ausbau	
m _F +m _R [g]	203,91	m _F +m _R [g]	194,03

Wassergehalte		
	Einbau	Ausbau
Behälter-Nr.	15	
m _F ' + m _B [g]	230,41	
m _T ' + m _B [g]	216,09	
m _B [g]	90,19	

Versuchsprotokoll für Kompressionsversuch ÖNORM B4420

PROJEKT		LABOR NR.	
PROJEKT NR.		AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	
BEARBEITER/IN		ENTNAHMETIEFE	

Erstbelastung ☒Entlastung ☐Wiederbelastung ☐2. Entlastung ☐

1. Laststufe				2. Laststufe			
	25	[kN/m²]			50	[kN/m²]	
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
18.12.19 09:58		6	-0,170	19/02/19 10:00		6	-0,080 -0,358
		15	-0,180			15	-0,080 -0,38
		30	-0,185			30	-0,085 -0,385
		1	-0,190			1	-0,390
		2	-0,20			2	-0,390
		5	-0,210			5	-0,395
		10	-0,215			10	-0,400
		30	-0,235			30	-0,410
	1		-0,245		1		-0,420
	2		-0,260		2		-0,425
	6:5:30		-0,280		6:5:30		-0,450
1 Tag	24:22		-0,335	1 Tag	24		-0,455
	23		-0,340				
	24		-0,340				

bitte wenden!

Labor Nr.

3. Laststufe				4. Laststufe			
	100 [kN/m ²]				200 [kN/m ²]		
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
10.07 (20/02)		6	- 0,555	21.2. 958		6	0,73
		15	- 0,560			15	0,74
		30	- 0,560			30	0,745
		1	- 0,565			1	0,755
		2	- 0,570			2	0,76
		5	- 0,575			5	0,77
		10	- 0,580			10	0,775
		30	- 0,590			30	0,790
	1		- 0,600		1		0,800
	2		- 0,610		2		0,810
	3		- 0,615		6		0,835
1 Tag	24		- 0,620	22.2. Tag	753	24	0,875
	6		- 0,625		8.56		0,880
903			- 0,67				
950			- 0,67				

5. Laststufe				6. Laststufe			
	400 [kN/m ²]				[kN/m ²]		
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
8.57		6	0,980			6	
		15	0,990			15	
		30	- 1,000			30	
		1	- 1,015			1	
		2	- 1,020			2	
		5	- 1,040			5	
		10	- 1,050			10	
		30	- 1,070			30	
	1		- 1,080		1		
	2		- 1,095		2		
	6		- 1,110		6		
25.2. Tag	24		- 1,255	1 Tag	24		

Labor Nr.

3. Laststufe				4. Laststufe			
	200		[kN/m ²]		100		[kN/m ²]
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
08.21/25/02		6	1,235	25/02/10.26		6	1,215
		15	1,235			15	1,215
		30	1,235			30	1,210
		1	1,235			1	1,210
		2	1,235			2	1,210
		5	1,230			5	1,210
		10	1,230			10	1,210
		30	1,230			30	1,210
	1		1,230		1		1,205
	2				2		1,205
	6				6		
1 Tag	24			1 Tag	24		

5. Laststufe				6. Laststufe			
	50		[kN/m ²]				[kN/m ²]
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
10.28		6	1,185			6	
		15	1,180			15	
		30	1,180			30	
		1	1,180			1	
		2	1,180			2	
		5	1,180			5	
		10	1,180			10	
		30	1,185			30	
	1		1,185		1		
	2		1,180		2		
	8.51		1,180		6		
26.2 1 Tag 7.28	24		1,18	1 Tag	24		
	8.25		1,18				

Versuchsprotokoll für Kompressionsversuch ÖNORM B4420

PROJEKT		LABOR NR.	
PROJEKT NR.		AUFTRGG-BEZ.	
VERSUCHSDAT.		ENTNAHMESTELLE	
BEARBEITER/IN		ENTNAHMETIEFE	

Erstbelastung ☐Entlastung ☐Wiederbelastung ☒2. Entlastung ☐

1. Laststufe <i>100</i> [kN/m ²]				2. Laststufe <i>200</i> [kN/m ²]			
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
<i>08.26 / 76/02</i>		6	<i>1,190</i>	<i>10.31</i>		6	<i>1,205</i>
		15	<i>1,190</i>			15	<i>1,210</i>
		30	<i>1,190</i>			30	<i>1,210</i>
		1	<i>1,190</i>			1	<i>1,210</i>
		2	<i>1,190</i>			2	<i>1,210</i>
		5	<i>1,190</i>			5	<i>1,210</i>
		10	<i>1,190</i>			10	<i>1,215</i>
		30	<i>1,190</i>			30	<i>1,215</i>
	1		<i>1,190</i>		1		<i>1,220</i>
	2		<i>1,190</i>		2		<i>1,220</i>
	6				6		
1 Tag	24			1 Tag	24		

bitte wenden!

Labor Nr.

3. Laststufe				4. Laststufe			
		400	[kN/m ²]			800	[kN/m ²]
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
26/02 12.35		6	1,250	27.2. 10 ¹⁰		6	1,39
		15	1,250			15	1,395
		30	1,250			30	1,40
		1	1,250			1	1,41
		2	1,255			2	1,415
		5	1,255			5	1,425
		10	1,260			10	1,435
		30	1,260			30	1,45
	1		1,265		1	7	1,465
	2		1,270		2		1,48
	85,30		1,280		6		1,505
27.2 1 Tag 8 ¹⁴	24		1,32	28.2 1 Tag 9 ²⁴	24		1,585
9 ³⁵			1,32				1,595
				7.3. 8 ⁴⁸			1,66

4.3. 7⁴⁸ 1,805
 5.3. 8¹⁸ 1,83

5. Laststufe				6. Laststufe			
			[kN/m ²]				[kN/m ²]
Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr	Datum, Startzeit	Stunden	Min., Sek.	Messuhr
		6		5.3. 11 ⁰⁰		6	1,835
		15		6.3. 09 ³⁰		15	1,850
		30		17.30		30	1,850
		1		8.3. 08 ⁴⁵		1	1,865
		2				2	
		5				5	
		10				10	
		30				30	
	1				1		
	2				2		
	6				6		
1 Tag	24			1 Tag	24		

A.2 Auswertung der Messungen mit der dynamischen Lastplatte

Ort:	Hungerburgtail (1. Messung)
Datum/ Uhrzeit:	04.07.2018, 08:00-10:30 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	11 (9)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall:	50-100m
Boden:	natürlich gewachsener Boden, Oberfläche meist trocken
Wetter, Tage vorhher:	Sonnig , leichter Regen am Vortag
Anmerkungen:	Erste Messreihe, Bodenproben (HuO und HuU)

n.B.	nicht berücksichtigte Referenz- o. Testmessungen
-	negative Umrechnungswerte
4.9	kein Messergebnis, Wert angenommen

								Umrechnung der Messergebnisse mit LFG			Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung				
			s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) Mittel [mm]	Evd gemessen [MN/m²]		Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]	Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Hungerburgtail	1	08:11	0.249	0.247	0.239	0.245	91.8	Forstweg 1. Test	102.3	76.5	183.7	5.6	4.7	4.7	11.3
	2	08:16	2.132	2.165	2.186	2.161	10.4	Probeentnahme Ödometer (HuO)	0.5	8.7	20.8	6.6	5.5	5.5	13.1
	3	08:20	4.343	3.833	3.802	3.993	5.6		-5.5	4.7	11.3	7.1	5.9	5.9	14.3
	4	08:23	1.851	1.857	1.879	1.862	12.1		2.6	10.1	24.2	9.8	8.2	8.2	19.6
	5	08:29	0.400	0.388	0.399	0.396	56.8	Kreuzug besteh. Wanderweg	58.5	47.3	113.6	10.4	8.7	8.7	20.8
	6	08:33	0.982	1.080	1.080	1.047	21.5	Probeentnahme Ödometer (HuO)	14.4	17.9	43.0	12.1	10.1	10.1	24.2
	7	08:36	2.229	2.432	2.240	2.300	9.8		-0.3	8.2	19.6	13.1	10.9	10.9	26.2
	8	08:40	3.516	3.436	3.342	3.431	6.6		-4.3	5.5	13.1	21.5	17.9	17.9	43.0
	9	08:45	3.013	3.191	3.265	3.156	7.1		-3.6	5.9	14.3	40.5	33.7	33.7	80.9
	10	08:46	1.852	1.675	1.621	1.716	13.1		3.9	10.9	26.2				
	11	08:50	0.559	0.554	0.556	0.556	40.5	38.1	33.7	80.9					
									Mittelwert [MN/m²]		14.1	11.7	11.7	28.1	
									Median [MN/m²]		10.4	8.7	8.7	20.8	

Ort:	Arzleralmtrail
Datum/ Uhrzeit:	04.07.2018, 08:00-10:30 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	31 (30)
Fehlgeschlagen Mess.:	2
Messintervall:	50-100m
Boden:	natürlich gewachsener Boden, Oberfläche meist trocken
Wetter, Tage vorhher:	Sonnig, Votrag leichte Regenschauer
Anmerkungen:	Erste Messreihe, Bodenproben (HuO und HuU)

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG			Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung					
			s1 (max)	s2 (max)	s3 (max)	s(max) Mittel	Evd gemessen [MN/m²]		Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]		Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]	
Arzleralmtrail	Nr.	Zeit	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		Anmerkungen zu der Messung									
	1	08:56	2.185	2.196	2.227	2.203	10.2	ab hier Arzleralm	0.3	8.5	20.4		4.9	-6.4	4.1	9.8	
	2	08:58	0.513	0.506	0.493	0.504	44.6		43.3	37.2	89.3		4.9	-6.4	4.1	9.8	
	3	09:00	1.988	1.937	1.886	1.937	11.6		2.0	9.7	23.2		5.7	-5.4		4.7	11.4
	4	09:03	1.071	1.059	1.044	1.058	21.3		14.1	17.7	42.5		5.8	-5.3		4.8	11.6
	5	09:06	0.979	0.966	0.949	0.965	23.3		16.6	19.4	46.6		6.0	-5.0		5.0	12.1
	6	09:08	0.308	0.297	0.295	0.300	75.0		81.3	62.5	150.0		6.7	-4.2		5.5	13.3
	7	09:10	0.660	0.650	0.621	0.644	34.9		31.2	29.1	69.9		8.1	-2.4		6.8	16.2
	8	09:12	0.816	0.775	0.761	0.784	28.7		23.4	23.9	57.4		8.1	-2.3		6.8	16.3
	9	09:14	1.372	1.361	1.328	1.354	16.6		8.3	13.8	33.2		8.7	-1.6		7.3	17.4
	10	09:17	0.498	0.489	0.464	0.484	46.5		45.6	38.7	93.0		9.2	-1.0		7.6	18.3
	11	09:20	2.760	2.756	2.773	2.763	8.1		-2.3	6.8	16.3		9.4	-0.8		7.8	18.7
	12	09:21	2.563	2.575	2.617	2.585	8.7		-1.6	7.3	17.4		9.8	-0.3		8.1	19.5
	13	09:23	2.339	2.335	2.245	2.306	9.8		-0.3	8.1	19.5		10.2		0.3	8.5	20.4
	14	09:26	1.091	1.061	1.048	1.067	21.1		13.9	17.6	42.2		11.6		2.0	9.7	23.2
	15	09:28	0.739	0.700	0.679	0.706	31.9		27.3	26.6	63.7		14.0		5.0	11.7	28.0
	16	09:31	2.883	2.742	2.696	2.774	8.1		-2.4	6.8	16.2		14.1		5.2	11.8	28.3
	17	09:33	4.050	3.831	3.962	3.948	5.7		-5.4	4.7	11.4		15.9		7.4	13.3	31.8
	18	09:35	3.693	3.691	3.804	3.729	6.0		-5.0	5.0	12.1		16.6		8.3	13.8	33.2
	19	09:38	3.433	3.389	3.328	3.383	6.7		-4.2	5.5	13.3		20.5		13.1	17.1	40.9
	20	09:40	0.446	0.441	0.435	0.441	51.0		51.3	42.5	102.0		21.1		13.9	17.6	42.2
	21	09:41	1.117	1.110	1.069	1.099	20.5		13.1	17.1	40.9		21.3		14.1	17.7	42.5
	22	09:43	0.617	0.636	0.647	0.633	35.5	Forstweg Referenzmessung	31.9	29.6	71.1		23.3		16.6	19.4	46.6
	23	09:47	0.934	0.912	0.872	0.906	24.8	Sandiger Boden (HuU)	18.5	20.7	49.7		24.8		18.5	20.7	49.7
	24	09:50	3.928	3.792	3.931	3.884	5.8	-5.3	4.8	11.6		28.7		23.4	23.9	57.4	
	25	09:54	1.426	1.418	1.395	1.413	15.9	7.4	13.3	31.8		31.9		27.3	26.6	63.7	
	26	10:03	1.600	1.576	1.596	1.591	14.1	5.2	11.8	28.3		34.9		31.2	29.1	69.9	
	27	10:05	2.231	2.412	2.570	2.404	9.4	-0.8	7.8	18.7		44.6		43.3	37.2	89.3	
	28	10:09	2.348	2.478	2.536	2.454	9.2	-1.0	7.6	18.3		46.5		45.6	38.7	93.0	
29	10:11	1.478	1.823	1.516	1.606	14.0	5.0	11.7	28.0		51.0		51.3	42.5	102.0		
													75.0	81.3	62.5	150.0	
												Mittelwert [MN/m²]	19.8	12.2	16.5	39.6	
												Median [MN/m²]	14.1	5.1	11.7	28.2	

Ort:	Hungerburg (2. Messung)
Datum/ Uhrzeit:	16.10.2018 16:30- 18:00 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	9 (9)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall:	50-100m
Boden:	natürlich gewachsener Boden, trockener Boden
Wetter, Tage vorhher:	Sonnig , zwei Wochen Sonne
Anmerkungen:	Doppel Messung, selbe Messtellen wie am 04.07.

Nr.	Zeit	s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) Mittel [mm]	Evd gemessen [MN/m²]	Anmerkungen zu der Messung	Umrechnung der Messergebnisse mit LFG		
								Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
1	16:34	0.548	0.555	0.565	0.556	40.5		38.1	33.7	80.9
2	16:46	2.089	2.011	1.994	2.031	11.1		1.3	9.2	22.2
3	16:52	0.538	0.524	0.552	0.538	41.8		39.8	34.9	83.6
4	16:54	0.520	0.529	0.536	0.528	42.6		40.8	35.5	85.2
5	16:57	1.125	1.084	1.091	1.100	20.5		13.1	17.0	40.9
6	17:05	2.394	2.359	2.198	2.317	9.7		-0.4	8.1	19.4
7	17:11	1.873	1.812	1.753	1.813	12.4		3.0	10.3	24.8
8	17:06	2.835	2.731	3.022	2.863	7.9		-2.7	6.5	15.7
9	17:36	2.215	2.128	2.110	2.151	10.5		0.6	8.7	20.9

Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
7.9	-2.7	6.5	15.7
9.7	-0.4	8.1	19.4
10.5	0.6	8.7	20.9
11.1	1.3	9.2	22.2
12.4	3.0	10.3	24.8
20.5	13.1	17.0	40.9
40.5	38.1	33.7	80.9
41.8	39.8	34.9	83.6
42.6	40.8	35.5	85.2

Mittelwert [MN/m²]	21.9	19.5	18.2	43.8
Median [MN/m²]	12.4	13.1	10.3	24.8

Ort:	Mutter Alm-Trail (unterer Teil) und Dirt Park
Datum/ Uhrzeit:	02.11.2018 09:00-11:00 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	26 (26)
Fehlgeschlagen Mess.:	4
Messintervall	ausgewählte Stellen
Boden	Waldboden mit Aufschüttung, feuchter Boden
Wetter, Tage vorhher:	bedeckt, Tage zuvor bewölkt und regnerisch
Anmerkungen	neu erstellter Flowtrail,

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG			Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
			s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) Mittel [mm]	Evd gemessen [MN/m²]		Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]	Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Mutterer Alm Trail	1	09:05	1.697	1.618	1.641	1.652	13.6	Probeentnahe Ödometer (MuA)	4.5	11.4	27.2	4.9	-6.4	4.1	9.8
	2	09:12	2.180	2.176	2.228	2.195	10.3		0.3	8.5	20.5	4.9	-6.4	4.1	9.8
	3	09:16	3.661	3.953	3.909	3.841	5.9		-5.2	4.9	11.7	4.9	-6.4	4.1	9.8
	4	09:19	1.656	1.645	1.608	1.636	13.8		4.7	11.5	27.5	4.9	-6.4	4.1	9.8
	5	09:23	1.418	1.622	1.534	1.525	14.8		5.9	12.3	29.5	5.9	-5.2	4.9	11.7
	6	09:31	2.049	2.443	1.994	2.162	10.4		0.5	8.7	20.8	5.9	-5.1	4.9	11.9
	7	09:34	3.294	2.978	3.009	3.094	7.3		-3.4	6.1	14.5	7.1	-3.6	6.0	14.3
	8	09:41	1.242	1.268	1.250	1.253	18.0		9.9	15.0	35.9	7.3	-3.4	6.1	14.5
	9	09:42	1.310	1.345	1.385	1.347	16.7		8.4	13.9	33.4	8.5	-1.8	7.1	17.1
	10	09:52	3.112	3.134	3.206	3.151	7.1		-3.6	6.0	14.3	9.0	-1.2	7.5	18.0
	11	09:58	2.356	2.302	2.475	2.378	9.5		-0.7	7.9	18.9	9.5	-0.7	7.9	18.9
	12	10:01	2.463	2.310	2.274	2.349	9.6		-0.5	8.0	19.2	9.6	-0.5	8.0	19.2
	13	10:04	2.535	2.498	2.452	2.495	9.0		-1.2	7.5	18.0	9.6	-0.5	8.0	19.2
	14	10:20	2.340	2.323	2.351	2.338	9.6		-0.5	8.0	19.2	10.3	0.3	8.5	20.5
	15	10:25	3.868	3.829	3.689	3.795	5.9		-5.1	4.9	11.9	10.4	0.5	8.7	20.8
	16	10:29	2.750	2.604	2.553	2.636	8.5		-1.8	7.1	17.1	13.4	4.2	11.1	26.7
Dirt Park	18	10:33	0.740	0.730	0.727	0.732	30.7	25.9	25.6	61.5	13.6	4.5	11.4	27.2	
	19	10:33	0.466	0.507	0.364	0.446	50.4	50.6	42.0	100.9	13.8	4.7	11.5	27.5	
	20	10:41	1.737	1.679	1.640	1.685	13.4	4.2	11.1	26.7	14.8	5.9	12.3	29.5	
	21	10:50	1.322	1.209	1.114	1.215	18.5	10.6	15.4	37.0	16.7	8.4	13.9	33.4	
	22	10:52	1.150	1.279	1.300	1.243	18.1	10.1	15.1	36.2	18.0	9.9	15.0	35.9	
												18.1	10.1	15.1	36.2
												18.5	10.6	15.4	37.0
												30.7	25.9	25.6	61.5
												50.4	50.6	42.0	100.9

Trail	Mittelwert [MN/m²]	9.5	4.9	7.9	18.9
	Median [MN/m²]	9.2	4.7	7.7	18.5
Dirt Park	Mittelwert [MN/m²]	26.2	20.3	21.9	52.5
	Median [MN/m²]	18.5	10.6	15.4	37.0

Ort:	Dirt Park beim Baggersee
Datum/ Uhrzeit:	17.10.2018, 11:00-12:00 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	12 (12)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall	an ausgewählten Stellen
Boden	Aushubmaterial von Baustellen und Inn
Wetter, Tage vorhher:	Sonnig, 2 Wochen sonnig
Anmerkungen	gut verdichtet

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG			Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
			s1 (max)	s2 (max)	s3 (max)	s(max) Mittel	Evd gemessen [MN/m²]		Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]	Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Dirt Park beim Baggersee	1	11:04	0.305	0.299	0.307	0.304	74.0		80.0	61.7	148.0	8.5	-1.9	7.1	17.0
	2	11:07	0.353	0.358	0.316	0.342	65.8		69.7	54.8	131.6	19.4	11.7	16.2	38.8
	3	11:09	0.350	0.294	0.311	0.318	70.8		75.9	59.0	141.5	19.7	12.1	16.4	39.4
	4	11:11	0.542	0.495	0.498	0.512	43.9		42.4	36.6	87.9	34.8	31.0	29.0	69.6
	5	11:15	2.660	2.656	2.607	2.641	8.5		-1.9	7.1	17.0	36.6	33.3	30.5	73.3
	6	11:17	0.263	0.244	0.265	0.257	87.5		96.9	73.0	175.1	43.9	42.4	36.6	87.9
	7	11:17	0.250	0.245	0.249	0.248	90.7		100.9	75.6	181.5	65.8	69.7	54.8	131.6
	8	11:19	0.658	0.641	0.642	0.647	34.8		31.0	29.0	69.6	70.8	75.9	59.0	141.5
	9	11:22	0.320	0.320	0.307	0.316	71.2		76.5	59.3	142.4	71.2	76.5	59.3	142.4
	10	11:24	0.621	0.626	0.595	0.614	36.6		33.3	30.5	73.3	74.0	80.0	61.7	148.0
	11	11:31	1.113	1.141	1.229	1.161	19.4		11.7	16.2	38.8	87.5	96.9	73.0	175.1
	12	11:32	1.063	1.111	1.254	1.143	19.7		12.1	16.4	39.4	90.7	100.9	75.6	181.5

Mittelwert [MN/m²]	51.9	57.3	43.3	103.8
Median [MN/m²]	54.9	69.7	45.7	109.7

Ort:	Blaustein
Datum/ Uhrzeit:	20.07.2018, 11:20- 13:30 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	15 (12)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall	50 m
Boden	Aufschüttung mit Schotter, letzten Teil nat. gewachsen
Wetter, Tage vorhher:	Sonnig,
Anmerkungen	mit Bagger erstellt und Schotter eingebacht

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG			Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
			s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) Mittel [mm]	Evd gemessen [MN/m²]		Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]	Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Nr.	Zeit							Anmerkungen zu der Messung							
Blaustein	1	11:28	0.289	0.301	0.265	0.285	78.9	Referenzmessung Parkplatz	86.2	65.8	157.9	15.4	6.8	12.8	30.8
	2	11:37	0.992	1.026	1.020	1.013	22.2	Referenzmessung Uphill	15.3	18.5	44.4	16.3	7.8	13.5	32.5
	3	11:41	0.587	0.583	0.597	0.589	38.2		35.3	31.8	76.4	19.4	11.8	16.2	38.9
	4	11:46	0.305	0.301	0.302	0.303	74.3		80.3	61.9	148.5	22.2	15.3	18.5	44.4
	5	11:49	0.206	0.198	0.197	0.200	112.5		128.1	93.8	225.0	27.8	22.3	23.2	55.6
	6	11:53	0.513	0.475	0.451	0.480	46.9		46.1	39.1	93.8	38.2	35.3	31.8	76.4
	7	11:56	0.553	0.519	0.600	0.557	40.4		38.0	33.7	80.8	40.4	38.0	33.7	80.8
	8	12:00	0.383	0.371	0.361	0.372	60.5		63.1	50.4	121.0	45.7	44.7	38.1	91.5
	9	12:06	0.323	0.327	0.341	0.330	68.2		72.7	56.8	136.4	46.9	46.1	39.1	93.8
	10	12:13	0.473	0.444	0.440	0.452	49.8		49.7	41.5	99.6	49.8	49.7	41.5	99.6
	11	12:21	1.509	1.471	1.402	1.461	15.4		Referenzmessung Waldweg	6.8	12.8	30.8	60.5	63.1	50.4
	12	12:24	1.207	1.133	1.131	1.157	19.4	gewachsener Boden	11.8	16.2	38.9	68.2	72.7	56.8	136.4
	13	12:27	1.368	1.385	1.399	1.384	16.3	gewachsener Boden	7.8	13.5	32.5				
	14	12:30	0.480	0.510	0.486	0.492	45.7	gewachsener Boden	44.7	38.1	91.5				
	15	12:32	0.913	0.697	0.816	0.809	27.8	gewachsener Boden	22.3	23.2	55.6				

Mittelwert [MN/m²]	37.6	34.5	31.3	75.1
Median [MN/m²]	39.3	36.6	32.7	78.6

Ort:	Serfaus- Fiss- Ladis (1 .Messreihe)
Datum/ Uhrzeit:	13.08.2018, 13:45-14:30 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	9 (9)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall	-
Boden	natürlich gewachsener Boden,
Wetter, Tage vorhher:	bewölkt, 3 Tage zuvor
Anmerkungen	Neuer Trail, Messung nach Verdichtung, Doppelmessung

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG		
	Nr.	Zeit	s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) [mm]	Evd gemessen [MN/m²]	Anmerkungen zu der Messung	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Serfaus-Fiss-Ladis _1. Messs	1	13:52	0.687	0.677	0.670	0.678	33.2	Fahrbweg	29.0	27.7	66.4
	2	13:56	1.671	1.708	1.667	1.682	13.4		4.2	11.1	26.8
	3	14:00	3.763	3.891	4.124	3.926	5.7		-5.3	4.8	11.5
	4	14:04	2.471	2.492	2.591	2.518	8.9		-1.3	7.4	17.9
	5	14:09	3.418	3.469	3.503	3.463	6.5		-4.4	5.4	13.0
	6	14:11	2.979	3.059	3.233	3.090	7.3		-3.4	6.1	14.6
	7	14:16	1.118	1.091	1.082	1.097	20.5		13.1	17.1	41.0
	8	14:19	3.004	3.160	3.145	3.103	7.3		-3.4	6.0	14.5
	9	14:22	2.689	2.469	2.402	2.520	8.9		-1.3	7.4	17.9

Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
5.7	-5.3	4.8	11.5
6.5	-4.4	5.4	13.0
7.3	-3.4	6.0	14.5
7.3	-3.4	6.1	14.6
8.9	-1.3	7.4	17.9
8.9	-1.3	7.4	17.9
13.4	4.2	11.1	26.8
20.5	13.1	17.1	41.0

Mittelwert [MN/m²]	9.8	8.7	8.2	19.6
Median [MN/m²]	8.1	8.7	6.8	16.2

Ort:	Serfaus- Fiss- Ladis (2 .Messreihe)
Datum/ Uhrzeit:	16.08.2018, 09:50-10:30 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	12 (12)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall	-
Boden	natürlich gewachsener , feuchter Boden
Wetter, Tage vorhher:	Sonnig , am Tag vorher auch
Anmerkungen	Messung nach Regen und erneuter Verdichtung, Doppelmessung

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG		
	Nr.	Zeit	s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) [mm]	Evd gemessen [MN/m²]	Anmerkungen zu der Messung	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Serfaus-Fiss-Ladis _2. Messung	1	09:55	1.408	1.417	1.336	1.387	16.2		7.8	13.5	32.4
	2	09:58	1.432	1.247	1.177	1.285	17.5		9.4	14.6	35.0
	3	10:01	1.290	1.219	1.202	1.237	18.2		10.2	15.2	36.4
	4	10:04	3.302	3.925	3.820	3.682	6.1		-4.9	5.1	12.2
	5	10:06	1.482	1.454	1.408	1.448	15.5		6.9	12.9	31.1
	6	10:09	3.411	3.453	3.389	3.418	6.6		-4.3	5.5	13.2
	7	10:11	2.588	2.653	2.648	2.630	8.6		-1.8	7.1	17.1
	8	10:13	2.068	2.180	2.275	2.174	10.4		0.4	8.6	20.7
	9	10:15	2.251	2.165	2.109	2.175	10.3		0.4	8.6	20.7
	10	10:17	1.688	1.681	1.613	1.661	13.5		4.4	11.3	27.1
	11	10:19	1.913	1.951	1.927	1.930	11.7		2.1	9.7	23.3
	12	10:20	1.786	1.808	1.653	1.749	12.9		3.6	10.7	25.7

Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
6.1	-4.9	5.1	12.2
6.6	-4.3	5.5	13.2
8.6	-1.8	7.1	17.1
10.3	0.4	8.6	20.7
10.4	0.4	8.6	20.7
11.7	2.1	9.7	23.3
12.9	3.6	10.7	25.7
13.5	4.4	11.3	27.1
15.5	6.9	12.9	31.1
16.2	7.8	13.5	32.4
17.5	9.4	14.6	35.0
18.2	10.2	15.2	36.4

Mittelwert [MN/m²]	12.3	5.0	10.2	24.6
Median [MN/m²]	12.3	4.4	10.2	24.5

Ort:	Venet
Datum/ Uhrzeit:	05.07.2018, 09:45-11:30 Uhr
Anz. Mess. (stat.):	15 (13)
Fehlgeschlagen Mess.:	0
Messintervall	50m
Boden	natürlich gewachsener Boden,
Wetter, Tage vorhher:	Bewölkt und leichter Regen , Regen Tage bevor
Anmerkungen	neu erstellt, mit Bagger

									Umrechnung der Messergebnisse mit LFG			Sortierte Mess- und Umrechnungswerte für statistische Auswertung			
			s1 (max) [mm]	s2 (max) [mm]	s3 (max) [mm]	s(max) Mittel [mm]	Evd gemessen [MN/m²]	Anmerkungen zu der Messung	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]	Evd [MN/m²]	Ev1, für bindige Böden [MN/m²]	Ev1, für nicht bindige Böden [MN/m²]	Ev2 [MN/m²]
Venet, neuer Weg	1	09:53	3.281	3.342	3.239	3.287	6.8		-3.9	5.7	13.7	5.1	-6.1	4.3	10.3
	2	09:56	4.675	4.271	4.212	4.386	5.1		-6.1	4.3	10.3	5.2	-6.0	4.3	10.4
	3	10:01	3.828	4.605	4.612	4.348	5.2		-6.0	4.3	10.4	5.2	-6.0	4.3	10.4
	4	10:05	2.709	2.738	2.697	2.715	8.3		-2.1	6.9	16.6	5.2	-6.0	4.3	10.4
	5	10:08	3.625	3.756	3.704	3.695	6.1		-4.9	5.1	12.2	5.5	-5.7	4.5	10.9
	6	10:11	4.109	4.104	4.164	4.126	5.5		-5.7	4.5	10.9	6.1	-4.9	5.1	12.2
	7	10:18	3.587	3.500	3.501	3.529	6.4		-4.5	5.3	12.8	6.4	-4.5	5.3	12.8
	8	10:22	2.551	2.528	2.560	2.546	8.8		-1.5	7.4	17.7	6.8	-3.9	5.7	13.7
	9	10:27	4.409	4.279	4.331	4.340	5.2		-6.0	4.3	10.4	8.3	-2.1	6.9	16.6
	10	10:39	4.503	4.336	4.162	4.334	5.2		-6.0	4.3	10.4	8.8	-1.5	7.4	17.7
	11	10:45	2.533	2.442	2.425	2.467	9.1		-1.1	7.6	18.2	9.1	-1.1	7.6	18.2
	12	10:53	1.418	1.287	1.433	1.379	16.3		7.9	13.6	32.6	9.8	-0.3	8.2	19.6
	13	10:57	2.587	2.209	2.100	2.299	9.8		-0.3	8.2	19.6	16.3	7.9	13.6	32.6
	14	11:03	1.777	1.810	1.793	1.793	12.5	Messung auf der Wiese	3.2	10.5	25.1				
	15	11:24	0.391	0.385	0.373	0.383	58.7	Messung auf Kiesweg	60.9	49.0	117.5				

Mittelwert [MN/m²]	7.5	7.9	6.3	15.0
Median [MN/m²]	6.4	7.9	5.3	12.8

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe. Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit die Universität, das/die Institut/e und der/die Arbeitsbereich/e, an dem/denen die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und die Betreuerin/nen bzw. der/die Betreuer zu nennen sind. Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatsoftware elektronisch im Dateiformat pdf ohne Kennwortschutz bei der/dem Betreuer/in einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur die/der Betreuerin/Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck am

.....

Matthias Steinmayr, BSc