

# DIPLOMARBEIT

## Master Thesis

### **Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Glasschaumgranulat für Anwendungen im Straßenbau**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

und

Dipl.-Ing. cand. Dr.techn. **Armin Steurer**

E220

Institut für Geotechnik

Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Muratcan Gümüş**, BSc

0627843

Rechte Wienzeile 21, 1040 Wien

Wien, im März 2016

-----  
(Muratcan Gümüş)

Auch wenn sie nicht die höchste Form einer wissenschaftlichen Leistung darstellen mag, ist diese Diplomarbeit unabhängig von ihrer Herkunft allen aus sozial schwächeren Familien stammenden Kindern gewidmet, die nach einer besseren Zukunft Ausschau halten. In diesem Sinne möge auf ihrem langen und hindernisreichen Weg die Bildung ihr einziger Weggenosse sein, denn

*„Der Stift ist stärker als das Schwert“.*

# Vorwort/Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Zuge eines Forschungsvorhabens an der TU Wien am Institut für Geotechnik durchgeführt und befasst sich mit dem Leichtschüttmaterial Glasschaumgranulat. Dieser Baustoff wurde experimentell im Erdbaulaboratorium sowie im Feld untersucht, um die mechanischen Eigenschaften von Glasschaumgranulat für Anwendungen im Straßenbau zu bestimmen.

An erster Stelle gebührt meiner Mutter ein herzlicher Dank für ihre lebenslange Unterstützung nach dem sehr frühen Tod meines Vaters.

Warum es das Schönste ist, Geschwister zu haben, ist das Stück Kindheit, das immer bleibt. Die Freundschaften wechseln, aber ich weiß, dass meine Geschwister immer für mich da sind. Danke dafür, dass ihr mein Leben bereichert.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Adam für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am Institut für Geotechnik umzusetzen. Ganz besonders gilt dieser Dank meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. cand. Dr.techn. Armin Steurer, der mir mit seiner wertvollen Unterstützung zur Seite stand.

Nicht zuletzt danke ich "meiner ehemaligen Freundin" für ihre einzigartige Begleitung durch die letzten neun schönen Jahre meines Lebens. Nun habe ich offiziell seit 30.05.2014 die Ehre, gemeinsam mit ihr durch das Leben zu gehen.

# Kurzfassung

Glasschaumgranulat (GSG) ist ein aus Altglas industriell hergestellter mineralischer Recyclingbaustoff, der neben seiner geringen Dichte über hohe Lebensdauer, geringe Wasseraufnahmefähigkeit, kapillarbrechende Wirkung, Nichtbrennbarkeit und Beständigkeit gegen Kohlenwasserstoffschäden verfügt. Glasschaumgranulat wird hauptsächlich als lastabtragende Wärmedämmung unter Bodenplatten und belastbare Leichtschüttung im Straßenbau angewendet.

Aktuell gibt es in Österreich keine Richtlinien oder Normen, welche einerseits Angaben zum Einbau und andererseits Anhaltspunkte für die Beurteilung der Qualität des errichteten Glasschaumgranulatkörpers beinhalten. Diese Arbeit hat sich daher zum Ziel gesetzt, Grundlagen hinsichtlich des Einbaues und der Abnahmeprüfung des Glasschaumgranulats als Leichtschüttmaterial zu schaffen, um dessen Anwendung im Straßenbau zu erleichtern.

Der Arbeit geht eine Literaturrecherche hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und Identitätsprüfung des Glasschaumgranulats für Anwendungen im Straßenbau voraus. Dabei wurde auf die Einbaurichtlinien der Hersteller, Regelwerke in verschiedenen Ländern und Forschungsvorhaben verschiedener Forschungseinrichtungen näher eingegangen.

Den Kern dieser Arbeit stellen Laborversuche dar, die an zwei Materialtypen Füll 100 und Druck 50 der Firma TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH im Erdbaulaboratorium der TU Wien durchgeführt wurden. Zu diesem Zweck wurden, um die Steifigkeit der GSG-Schichten zu ermitteln, Kompressionsversuche unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Last-Verformungsverhaltens durchgeführt. In weiterer Folge wurden an zylindrischen Probekörpern Triaxialversuche durchgeführt, um die Scherfestigkeit der beiden zu untersuchenden Materialtypen zu ermitteln. Mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (LFG) wurden dynamische Lastplattenversuche durchgeführt, um die Verdichtung der GSG-Schichten zu beurteilen.

Zuletzt erfolgten im Zuge des Bauvorhabens Knoten Prater Baustellenversuche, um einen Bezug zwischen den Laborversuchen und der praxisorientierten Anwendung von Glasschaumgranulat im Straßenbau darzustellen. Aufgrund der angewendeten Verdichtungstechnologien konnten Erkenntnisse bezüglich der Verdichtung der GSG-Schichten gewonnen und für eine repräsentative Prüfung der Verdichtung abgeleitet werden. Außerdem wurde untersucht, ob die Ergebnisse des dynamischen Lastplattenversuchs mit dem Leichten Fallgewichtsgerät für die Beurteilung der Qualität der Leichtschüttung anwendbar sind.

# Abstract

Glass foam aggregate (GFA) is a mineral recycled building material which is industrially produced from waste glass. Its characteristics include a long lifespan, low water absorbency and anti-capillary properties. Additionally, it is non-flammable and resistant to hydrocarbon contamination. GFA is primarily used as load-bearing thermal insulation under foundation slabs and as light filling material in road constructions.

There are no currently existing standards or guidelines in Austria which might provide information regarding the installation of glass foam aggregate (GFA) on the one hand and reference points for the quality assessment of granulated foam structures on the other hand. Therefore, this thesis aims to establish basic principles regarding installation and acceptance tests for granulated foam glass as light filling material in order to facilitate its application in road constructions.

The practical part of the thesis was preceded by literature research, particularly concerning the mechanical properties of GFA for applications in road constructions. Research especially focused on manufacturers installation guidelines, technical regulations in different countries, and research projects carried out at various research institutions.

The main part of this thesis are laboratory tests performed at the earthworks laboratory at Vienna University of Technology. These tests focused on two material types, Füll 100 and Druck 50, by TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH. Compression tests were performed in order to determine the rigidity of the GFA layers, taking into account the time-dependent load deformation behaviour. Furthermore, triaxial tests were carried out with cylindrical test samples in order to determine the shear strength of the two examined material types. The light drop-weight tester was used in dynamic load plate tests to determine the degree of compacting of the GFA layers.

Lastly, construction site testing in the course of the Knoten Prater road construction project was performed in order to link laboratory testing with the practical application of GFA in road constructions. The applied compaction technologies resulted in findings concerning the compaction of GFA layers which could be used to derive criteria for representative compression tests. Another focus of investigation was to determine whether the results of the dynamic load plate test using the light drop-weight tester may be used in the quality assessment of light fillings.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeine Beschreibung des Leichtschüttmaterials Glasschaumgranulat . . . . .	1
1.2	Problembeschreibung . . . . .	1
1.3	Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Allgemeines . . . . .	3
2.2	Herstellung vom Glasschaumgranulat . . . . .	4
2.3	Stand der Technik . . . . .	5
2.3.1	Regelwerke (Richtlinien, Vorschriften) in verschiedenen Ländern . . . . .	6
2.3.2	Literaturquellen . . . . .	8
2.4	Zusammenfassung . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Laborversuche</b>	<b>11</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	11
3.2	Versuchsprogramm . . . . .	12
3.3	Versuche am Einzelkorn [27] . . . . .	14
3.3.1	Reindichte $\rho_r$ [27] . . . . .	14
3.3.2	Rohdichten $\rho_s$ und Porenanteile $n_s$ [27] . . . . .	14
3.3.3	Einaxiale Druckversuche [27] . . . . .	15
3.3.4	Zusammenfassung der Versuche am Einzelkorn . . . . .	19
3.4	Kompressionsversuche . . . . .	20
3.4.1	Allgemeines . . . . .	20
3.4.2	Probenherstellung . . . . .	20
3.4.3	Versuchsdurchführung und Dokumentation der Probeverformung . . . . .	21
3.4.4	Auswertung der Versuche . . . . .	25
3.5	Triaxialversuche . . . . .	32
3.5.1	Allgemeines . . . . .	32
3.5.2	Probenherstellung . . . . .	32
3.5.3	Versuchsdurchführung . . . . .	35
3.5.4	Auswertung der Versuche . . . . .	36
3.6	Dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät . . . . .	41
3.6.1	Allgemeines . . . . .	41
3.6.2	Beschreibung des Leichten Fallgewichtsgerätes . . . . .	41
3.6.3	Untersuchungen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät an GSG-Proben . . . . .	43
3.6.4	Versuchsdurchführung ohne Auflastring um die Lastplatte . . . . .	43

---

3.6.5	Probenherstellung . . . . .	43
3.6.5.1	Auswertung der Versuche . . . . .	45
3.6.6	Versuchsdurchführung mit Auflasting um die Lastplatte . . . . .	49
3.6.6.1	Auswertung der Versuche mit Auflasting um die Lastplatte . . . . .	51
3.6.7	Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse mit und ohne Auflast . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Feldversuche</b>	<b>59</b>
4.1	Allgemeines . . . . .	59
4.2	Planung des Probefeldes . . . . .	60
4.3	Ausführung des Probefeldes und Versuchsdurchführung . . . . .	60
4.3.1	Planum . . . . .	61
4.3.2	Lage 1 . . . . .	62
4.3.3	Lage 2 . . . . .	67
4.3.4	Lage 3 . . . . .	75
4.4	Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse . . . . .	79
4.4.1	Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ . . . . .	79
4.4.1.1	Dynamische Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ nach Einbau . . . . .	79
4.4.1.2	Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ der Lage 1 . . . . .	81
4.4.1.3	Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ der Lage 2 . . . . .	83
4.4.1.4	Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ der Lage 3 . . . . .	84
4.4.2	Vergleich der Dichten $\rho$ und der Verdichtungsverhältnisse $v_F$ . . . . .	84
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>91</b>
6.1	Literatur . . . . .	91
6.2	Abbildungsverzeichnis . . . . .	93
6.3	Tabellenverzeichnis . . . . .	95

# **1 Einleitung**

## **1.1 Allgemeine Beschreibung des Leichtschüttmaterials Glasschaumgranulat**

Glasschaumgranulat (GSG) ist ein leichter Recyclingbaustoff, der aus sortiertem Altglas hergestellt wird, wodurch die ökologische Nachhaltigkeit gewährleistet wird. Aufgrund der geringen Dichte zeichnet sich das Glasschaumgranulat als Schüttmaterial bei weichen Böden aus, die zu größeren Verformungen neigen. Der Einbau von Glasschaumgranulat erfolgt mit konventionellen Baumaschinen des Erdbaus.

## **1.2 Problembeschreibung**

Eine Literaturrecherche ergab, dass aufgrund einer fehlenden Normenlage die Anwendung von Glasschaumgranulat auf die Einbaurichtlinien der Hersteller und Regelwerke in verschiedenen Ländern beruht, deren Kriterien jedoch nur bedingt geeignet sind, um das reale Materialverhalten des Glasschaumgranulats als lastabtragender Baustoff zu beurteilen, da keine einheitlichen Einbaukriterien und Abnahmeprüfungen festgelegt sind und somit der Einbau sowie eine sachgemäße Kontrolle der eingebauten GSG-Schichten nicht eindeutig definiert ist. Es wird als einziges Abnahmekriterium vom Verdichtungsgrad nämlich von der Intensität der Verdichtung ausgegangen. Die Anforderungen an Glasschaumgranulat, die aus dem Betrieb des Bauwerks resultieren (Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit, Beständigkeit), erfordern klare Einbau- und Messmethoden, anhand deren Ergebnisse die Gebrauchstauglichkeit und die Tragfähigkeit der GSG-Schüttung beurteilt werden können, um das reale Materialverhalten des GSG als lastabtragender Baustoff im Straßenbau zu beschreiben.

## **1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, einen Beitrag zur Beurteilung von Glasschaumgranulatschichten hinsichtlich des mechanischen Verhaltens als lastabtragender Baustoff im Straßenbau zu leisten sowie Grundlagen bezüglich des Einbaus und der Verdichtung von Glasschaumgranulat zu schaffen.

Um den Einfluss der Materialeigenschaften und der Intensität der Verdichtung auf die Steifigkeit und Festigkeit von GSG-Probekörper zu dokumentieren, werden Laborversuche durchgeführt. Hierfür werden Proben mit unterschiedlichen Materialien mit verschiedener Intensität der Verdichtung hergestellt. Dadurch soll der Einfluss der Materialeigenschaften und die Intensität der Verdichtung auf die Steifigkeit und die Scherfestigkeit aufgezeigt werden. Zuletzt werden die im Zuge der im Labor erworbenen Kenntnisse im Rahmen

des Bauvorhabens Knoten Prater in die Praxis umgesetzt, um bezüglich des Einbaus der GSG-Schichten und deren Verdichtung neue Kenntnisse zu gewinnen.

Diese Arbeit soll eine Grundlage im Hinblick auf den Einbau und der Abnahmekriterien für GSG-Schichten für weitere Arbeiten bilden, um eine Normenlage für den Einsatz von Glasschaumgranulat im Straßenbau zu gewinnen. Glasschaumgranulat als äußerst ressourcenschonendes, ökologisches Recyclingmaterial hat im Straßenbau ein enormes Potential und daher sind einheitliche sowie aussagekräftige Prüfmethoden von großer Bedeutung, damit das Material erfolgreich angewendet werden kann.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Allgemeines

Glasschaumgranulat ist ein industriell aus Altglas in einem thermo-chemischen Prozess hergestellter Recyclingbaustoff [2].



Abbildung 2.1: Glasschaumgranulat [8]

Als ein anorganischer, leichter Baustoff mit einer zumeist geschlossenen Zellenstruktur weist Glasschaumgranulat eine Fülle technisch nutzbarer und energetisch günstiger Eigenschaften auf [7]. Einige dieser in Folgendem angeführten Eigenschaften sind grundlegend für den dauerhaften Einbau in Erdbauwerken [2], [16], [7]:

- alterungsbeständig
- beständig gegen Fraßschäden
- gering wasseraufnahmefähig
- formstabil
- gering deformierbar
- unverrottbar
- resistent gegenüber Säuren und anderen Chemikalien

Zusätzlich zu den oben aufgezählten Eigenschaften verfügt der Baustoff über eine niedrige Wärmeleitfähigkeit und hohe Recyclefähigkeit.

Die Korndurchmesser von Glasschaumgranulat erstrecken sich über einen Bereich von ca. 10 bis 63 mm [17], [23], [22]. Die Trockendichte (= Dichte der trockenen GSG-Schicht) variiert in Abhängigkeit der Verdichtung sowie des Materials von  $150 \text{ kg/m}^3$  und  $350 \text{ kg/m}^3$  und somit um ca. eine Zehnerpotenz weniger als ein mineralischer Erdbaustoff [2].

Die Druckfestigkeit des Einzelkorns ist Herstellungsprozess abhängig und bewegt sich in einer Größenordnung von  $2\text{-}3 \text{ MN m}^2$  [2]. Der Reibungswinkel des Korngemisches beträgt ca.  $45^\circ$  [17], [23], [22].

Die Anlieferung erfolgt lose im LKW oder verpackt in Big Bags ( $1,5\text{-}3,0 \text{ m}^3$ ) (siehe Abb. 2.2).



Abbildung 2.2: links: Anlieferung per LKW, rechts: Anlieferung in Big Bags [15]

## 2.2 Herstellung vom Glasschaumgranulat

Bei der Herstellung von Glasschaum unterscheidet man prinzipiell zwischen 2 Arten: Trockenschäumung und Nassschäumung. Das Ziel der beiden Herstellungsverfahren ist es, eine Gasblase in dem zähflüssigen Glas einzuschließen [5].

Bei der Nassschäumung wird das trockene Glasmehl mit flüssigen Bestandteilen wie Wasserglas und Glycerin (= Treibmittel) vermischt. Die Mischung wird auf ein mit Kaolin getränktes Glasvlies aufgebracht und durch einen Ofen bewegt. Der enthaltene Kohlenstoff verbrennt bei Temperaturen über dem Erweichungspunkt von Glas ( $650\text{-}750 \text{ }^\circ\text{C}$ ) zu  $\text{CO}$  sowie  $\text{CO}_2$  und bildet jene Gasblasen, die aufgrund der Temperatur für die Aufschäumung des versinternden Glases verantwortlich sind. Beim Verlassen des Ofens zerbricht der sehr feinporig aufgeschäumte, dunkelgrau bis schwarze Glasschaum aufgrund des Temperaturabfalls in  $4\text{-}6 \text{ cm}$  große Stücke [5], [7].



Abbildung 2.3: links: Glaspulver-Treibmittelgemisch auf Endlosband aus Edelstahl, rechts: fertiger „Kuchen“ [Fotos: TECHNOpor<sup>®</sup>]

Bei der Trockenschäumung werden als Treibmittel Karbide verwendet, welche mit dem Glaspulver vermischt werden. Die Mischung wird trocken auf ein Edelstahlblech verteilt, das kontinuierlich durch einen Ofen bewegt wird. Durch gezielte Einbringung einer Temperatur von ca. 900 °C erfolgt eine gleichmäßige Wärmebehandlung. Das versinternde Glas wird durch  $CO_2$ , welches frei wird, aufgeschäumt und es entstehen Glasschaum-Platten. Beim Verlassen des Ofens zerbricht die Glasschaumplatte und es entsteht Glasschaumgranulat [5], [7].



Abbildung 2.4: links: GSG hergestellt mit Trockenschäumverfahren, rechts: mit Nassschäumverfahren [28]

Die Herstellung der beiden Materialtypen G150 (2013) und G210 (2013), die im Zuge dieser Arbeit untersucht wurden, erfolgte mittels Trockenschäumermethode.

## 2.3 Stand der Technik

Die im Rahmen einer Literaturrecherche hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von Glasschaumgranulat und der Feldversuche inkl. Einbau und Verdichtungskontrolle gesammelten Informationen wurden in diesem Kapitel zusammengefasst.

### 2.3.1 Regelwerke (Richtlinien, Vorschriften) in verschiedenen Ländern

#### SINTEF (Norwegen) [26]

In Norwegen wurden bereits im Jahr 2001 von SINTEF, der größten unabhängigen Forschungsorganisation in den skandinavischen Ländern, als Teil eines Projektes Untersuchungen an zwei Materialtypen Standard und Leicht der Firma<sup>®</sup> HASOPOR durchgeführt, um verschiedene Eigenschaften des GSG für Anwendungen im Straßenbau zu ermitteln.

Im Triaxialgerät wurden die Spannungssituationen, denen das GSG ausgesetzt wird, nachgebildet. Untersucht wurden Proben mit einem Durchmesser von  $d = 300$  mm und einer Höhe von  $h = 600$  mm. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass der E-Modul für das von SINTEF verwendete Spannungsintervall zw. 80 bis  $350 \text{ kN/m}^2$  variierte. Weiteres wurde festgestellt, dass der Widerstand gegen dauerhafte Deformation nicht mit steigendem Seitendruck ansteigt, sodass die Proben bei einem Seitendruck von  $200 \text{ kN/m}^2$  leichter deformiert wurden als bei einem Seitendruck von 50 und  $100 \text{ kN/m}^2$ . Dies wird darauf zurückgeführt, dass das Zerbrechen der Körner an den Berührungspunkten ein wichtiger Faktor für den Mechanismus zur Bildung permanenter Deformationen ist. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass das Material nicht hohen deviatorischen Spannungen ausgesetzt wird. Darausfolgend erscheinen  $75 \text{ kN/m}^2$  als realistischer Grenzwert für die senkrechte Belastung.

#### Swedish Geotechnical Institute (Schweden) [18]

In Schweden wurde im Jahr 2008 von Swedish Geotechnical Institute ein Handbuch (siehe Skumglas i mark och vägbyggnad) herausgegeben, welches die Anwendung von GSG im Straßenbau erleichtern soll.

Glasschaumgranulat soll in jenen Straßenkonstruktionen zum Einsatz kommen, welche kleinen Belastungen ausgesetzt sind wie beispielsweise Fußgänger- und Fahrradwegen, Sportanlagen etc. Bei der Dimensionierung des Oberbaus soll darauf geachtet werden, dass die Vertikalspannung  $75 \text{ kN/m}^2$  nicht übersteigt.

Die Verteilung des Materials soll in Schichten mit einer Stärke von mind. 0,15 m erfolgen. Die Schichthöhe des verdichteten Glasschaumgranulatschichten soll max. 0,8 m betragen, wobei die Böschungsneigung 1:1 oder flacher sein soll. Empfehlungen bezüglich der Verdichtung von Glasschaumgranulat und der Anforderungen an die Verdichtungsgeräte erfolgen gemäß Tab. 2.1.

Tabelle 2.1: Empfehlungen für Verdichtung von Glasschaumgranulat [18]

Einsatz	Leichtschütt- material	Frostschutz- material	Füllmaterial Rohrleitungsgräben
<b>Raupenfahrzeuge</b>	$\leq 50 \text{ kN/m}^2$	$\leq 50 \text{ kN/m}^2$	-
max. Schichtstärke nach Verdichten	0,8 m	0,55 m	-
Anzahl der Überfahrten	2	2	-
<b>Rüttelplatte (Masse)</b>	100-200 kg	100-200 kg	50 kg
max. Schichtstärke nach Verdichten	0,5 m	0,5 m	0,3 m
Anzahl der Überfahrten	2	2	4

Die Feldversuche, die ca. 4 Jahre nach Einbau von GSG durchgeführt wurden, ergaben einen Wassergehalt von 15-25 Vol.% und eine damit verbundene Zunahme der Dichte von ca. 30 bis  $50 \text{ kg/m}^3$  [18].

### Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (Deutschland)

In Deutschland ist für die Materialzulassung das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) zuständig. Es wurden im Zuge dieser Arbeit die Zulassungen für folgende Hersteller miteinander verglichen:

- TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH - Produkt: Perimeter 50 [29]
- MISAPOR Deutschland GmbH - Produkte: Misapor 10/50 und Misapor 10/75 [32]
- Steinbach Schaumglas GmbH & Co. KG - Produkt: ecoglas [30]
- GEOCELL Schaumglas GmbH - Produkt: GEOCELL Schaumglas S [33]
- Glapor Werk Miiterteich GmbH - Produkte: GLAPOR Glasschaumschotter S-G-150 und GLAPOR Glasschaumschotter SG 800 P [31]

Der Vergleich zeigte, dass unabhängig vom Hersteller und Produkt die selben Anforderungen zu erfüllen sind. Folgend werden die wichtigen Passagen aus der Zulassung für das Produkt Perimeter 50 der Firma TECHNOpor<sup>®</sup>, welches im Zuge dieser Arbeit untersucht wurde, wiedergegeben:

Anwendung findet das GSG als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten bei vorwiegend ruhender Belastung. Der maximale Korndurchmesser beträgt  $\leq 60 \text{ mm}$ . Jeder Einzelwert der Schüttdichte muss bei jedem Versuch in einem nicht weniger als 20l Messgefäß mindestens  $160 \text{ kg/m}^3$  und höchstens  $190 \text{ kg/m}^3$  betragen. Jeder Einzelwert der Druckspannung bei 10 % Stauchung muss mindestens  $560 \text{ kN/m}^2$  betragen. Der Nennwert der Druckfestigkeit beträgt  $f_{c,Nenn} = 560 \text{ kN/m}^2$  und der Bemessungswert der Druckspannung  $f_{cd} = 270 \text{ kN/m}^2$ . Der Steifemodul  $E_s$  wird mit  $E_s = 6 \text{ MN/m}^2$  angegeben. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit beträgt  $\lambda = 0,12 \text{ W/(mK)}$  und darf den Grenzwert  $\lambda_{Grenz} = 0,093 \text{ W/(mK)}$  nicht überschreiten.

Weiteres soll das Material nicht im Kapillarsaum des Grundwassers eingesetzt werden (in der Regel 30 cm über HGW). Die Höhe  $H$  der GSG-Schicht soll zwischen  $150 \text{ mm} \leq H \leq 900 \text{ mm}$  betragen, wobei Schichthöhen  $H > 300 \text{ mm}$  in zwei bzw. drei Lagen zu schütten und zu verdichten sind. Die Beurteilung der Verdichtung erfolgt mit einem Verdichtungsverhältnis von  $v = 1,3 : 1$ .

### 2.3.2 Literaturquellen

#### Beiträge zur Anwendung von GSG im Abschnitt München-Salzburg der Autobahn A8 [12]

Im Zuge des Bauvorhabens BAB A8 wurde bei Bernau am Chiemsee das GSG auf einem sehr setzungsempfindlichem Untergrund zur Reduktion des Dammkörpergewichts hinter den Brückenwiderlagern eingesetzt. Die GSG-Schüttung wurde mit einer Mächtigkeit von 3,5 m und 35 m Länge als auskeilender Körper ausgeführt. Es handelt sich dabei um eine sehr hochbelastete Autobahn, Berechnungen zufolge betrug die maximale Belastung des GSG von  $100 \text{ kN/m}^2$  inklusive der Verkehrsauflast.

Beim Einbau wurde das GSG allseitig durch ein Trennvlies umhüllt. Der Einbau und die Verteilung erfolgte lageweise mit einer Schichtstärke von 50 cm mit einer Schubraupe. Die ersten beiden Lagen dienten als Probefelder, um die Art des Einbaues, der Verdichtung und der Verdichtungskontrolle zu optimieren. Nach vier Überfahrten im statischen Modus einer 8 t Walze konnte ein optimaler Verdichtungsgrad von  $V = 1,3$  erreicht werden. Die Verdichtungskontrolle erfolgte mit dem Leichten Fallgewichtsgerät und mit einem Densitometer mit Gummiblase. Bei dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd} > 12\text{-}15 \text{ kN/m}^2$  galt das GSG als ausreichend verdichtet und bei  $E_{vd}$ -Werten  $> 20 \text{ kN/m}^2$  wurde kaum ein höherer Verdichtungsgrad, jedoch eine größere Kornzertrümmerung festgestellt.

Das Verhalten des GSG wurde über einen längeren Zeitraum messtechnisch beobachtet. Die im Bereich der Fahrbahn gemessenen Setzungen liegen bei 2-4 cm pro Jahr. Zwei Jahre nach Verkehrsfreigabe zeigten die Inklinometer sowohl an der Basis als auch an der Oberkante des GSG-Körpers den gleichen Setzungsverlauf. Dies bedeutete, dass innerhalb des GSG-Körpers keine Differenzsetzungen auftraten.

#### Flughafen Rom-Fiumicino, Landebahn 3 16L/34R [9]

Um den Einsatz vom Glasschaumgranulat als Leichtfüllmaterial bei Sanierungsarbeiten der Landebahn 3 16L/34R am Flughafen Fiumicino zu untersuchen, wurde an der Universität Pisa ein Versuchskonzept entwickelt, welches sowohl Labor- als auch Felduntersuchungen beinhaltete. Untersucht wurden Glasschaumgranulate mit einem Korndurchmesser von 20-63 mm.

Es wurden CBR (California Bearing Ratio)-Versuche an Proben mit verschiedenen Verdichtungsgraden durchgeführt, wobei der Verdichtungsgrad nach Anzahl der Umdrehungen des Gyratory-Verdichters definiert wurde. Die Ergebnisse der CBR-Versuche zeigten, dass bei 60 und 120 Umdrehungen des Gyratory-Verdichters verdichteten Proben der höchste CBR-Wert erreicht wurde. Bei 180 Umdrehungen des Gyratory-Verdichters verdichteten Proben waren jedoch dieselben Werte festzustellen wie bei 30 Umdrehungen des Gyratory-Verdichters verdichteten Proben. Dies wird mit einer Kornzertrümmerung begründet, welche sich

durch Erhöhen des Verdichtungsgrades, nämlich der Verdichtungsintensität, einstellt; ein höherer Verdichtungsgrad bedeutet gleichzeitig eine größere Kornzertrümmerung, die eine Abnahme der Tragfähigkeit mit sich bringt.

Die Ergebnisse der Scherversuche zeigen, dass die Scherfestigkeit der GSG-Proben von einer guten Verzahnung zwischen den GSG-Körnern innerhalb der Probekörper abhängig ist, welche sich bereits nach Erreichen eines geringen Verdichtungsgrades einstellt. Die Dichte der Proben für diesen Verdichtungsgrad betrug dabei zw. 300 und 450 kN/m<sup>3</sup>.

Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse wurden im Zuge eines Versuchsfeldes im Gelände des Flughafens Fiumicino in die Praxis umgesetzt. Das Versuchsfeld hatte eine Länge von 50 m und eine Breite von 5 m mit zwei GSG-Schichten. Beide Schichten wurden mit einer Stärke von 40 cm geschüttet und auf eine Endschichtstärke von 30 cm verdichtet. Aufgrund der Ergebnisse wurde ein dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd}$  von 25 kN/m<sup>2</sup> als Bemessungswert für GSG-Schichten festgelegt. Weitere Versuche zeigten, dass das Materialverhalten bei Erhöhung der vertikalen Belastung bis deutlich über 100 kN/m<sup>2</sup> weiterhin stabil blieb.

### **Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications [1]**

GSG-Körper, die zwischen den Jahren 1999 und 2003 auf verschiedenen Baustellen in Norwegen errichtet wurden, beobachtete man im Zuge eines Monitoringprogrammes über einen längeren Zeitraum hinsichtlich der Änderungen des Wassergehaltes, der Dichte und den Verformungen. Die Art der Verdichtung und die Verdichtungsgeräte wurden in Abhängigkeit von der Anwendung festgelegt. Die Korndurchmesser des eingesetzten Materials erstrecken sich über einen Bereich von ca. 10 bis 60 mm mit einer Schüttdichte von 180-250 kN/m<sup>3</sup>. Der Verdichtungsgrad betrug 1,2-1,3. Obwohl Verformungen von 1-2 %:1 der Schichtstärke prognostiziert wurden, bleiben diese in einem Beobachtungszeitraum von 3 Jahren vernachlässigbar klein oder  $\leq 1,5$  % der Schichtstärke. Aufgrund der durchgeführten Triaxialversuche wurde der Grenzwert für die senkrechte Belastung mit 75 kN/m<sup>2</sup> festgelegt.

### **Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von GSG (UIBK & TU Wien) [5]**

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens an der Universität Innsbruck und an der TU Wien wurden die Eigenschaften von GSG als lastabtragende Schicht unter Gründungskörper untersucht. Bei den Versuchen wurden die Schüttdichte, die Schichthöhe, die Art des Einbaues, die Verdichtung und die Größe des Laststempels variiert.

Im Zuge der Versuche wurde festgestellt, dass die Verdichtung einen großen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Während bei 25 % Verdichtung unter der höchsten Belastung von 800 kN/m<sup>2</sup> eine maximale Verformung von ca. 55 mm gemessen wurde, betrug diese bei 10 % Verdichtung ca. 92 mm und somit um 67 % größer als bei 25 % Verdichtung. Außerdem wurden bei einer 25 % Verdichtung ca. doppelt so große Werte für Verformungsmoduln erhalten als bei einer 10 % Verdichtung. Obwohl die Belastung zeitweise auf 1700 kN/m<sup>2</sup> gesteigert wurde, konnte kein grundbruchartiges Versagen beobachtet werden.

Weiteres wurde festgestellt, dass GSG ein ausgeprägtes Kriechverhalten aufweist. Anhand eines Langzeitversuchs wurden bei einer 50 cm starken, mit einer 25 % Verdichtung, 2-lagig eingebauten GSG-Schicht

die Kriechverformungen beobachtet. Bei einer Belastung von  $300 \text{ kN/m}^2$  wuchsen die Verformungen ausgehend von einer Anfangsverformung von 16 mm innerhalb von 3 Tagen auf 21 mm zu, was eine Zunahme von 31 % bedeutete.

An geschliffenen Prismen wurde eine mittlere Dichte von  $0,277 \text{ g/cm}^3$  ermittelt. Bei einaxialen Druckfestigkeiten an mehreren Proben wurde eine mittlere Bruchfestigkeit von  $3,911 \text{ kN/m}^2$  gemessen. Im Großscherrahmen der TU Freiberg durchgeführte Versuche ergaben einen Reibungswinkel von 37,4 %.

## 2.4 Zusammenfassung

Für die Anwendung vom GSG existiert in Österreich derzeit kein Regelwerk. In Deutschland beruht die Anwendung vom GSG auf einer Zulassung des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt). Dieser legt als einziges Einbaukriterium ein Verdichtungsverhältnis von  $V = 1,3 : 1,0$  fest, welches eingehalten werden muss, wobei die Art des Einbaues und die Kontrolle der Verdichtung nicht im Detail beschrieben sind. Außerdem wird von ruhenden Lasten ausgegangen, sodass die Kriterien nicht für den Einsatz des GSG im Straßenbau unter dynamischen Lasten geeignet sind.

Es wurden in anderen Ländern projektspezifische Erfahrungen im Umgang mit GSG veröffentlicht. Norwegen hat im Umgang mit GSG die Führungsrolle übernommen und es wurden Publikationen zum Thema Leichtschüttmaterial Glasschaumgranulat veröffentlicht. Diese gehen jedoch nicht auf die Art des Einbaues, die Art und Intensität der Verdichtung im Detail ein.

Der Autor ist der Meinung, dass neben dem Verdichtungsverhältnis die mechanischen Eigenschaften, die Art des Einbaues, die Art und die Intensität der Verdichtung genauer beachtet werden müssen, um das GSG unter dynamischen Lasten erfolgreich anwenden zu können.

# 3 Laborversuche

## 3.1 Allgemeines

Im Zuge dieser Arbeit wurden im Erbbaulaboratorium der Technischen Universität Wien experimentelle Versuche an Glasschaumgranulat durchgeführt. Grundsätzlich wurden zwei verschiedene Materialtypen der Firma TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH untersucht. Bei den untersuchten Materialtypen handelt es sich um die Produkte Füll 100 und Druck 50, die im Zuge der Arbeiten gemäß Tab. 3.1 bezeichnet wurden. Die Abkürzung „G“ bei der Bezeichnung steht für Glasschaumgranulat.

Tabelle 3.1: Bezeichnung der untersuchenden Materialtypen

Produktbezeichnung (Hersteller)	Schüttdichte <sup>1</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Herstellungsjahr	Bezeichnung
Füll 100	150	2013	G150 (2013)
Druck 50	210	2013	G210 (2013)

<sup>1</sup> Angaben des Herstellers, [Quelle: TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH]

In Abb. 3.1 wurden für beide Materialtypen die Sieblinien dargestellt, die im Anlieferungszustand ermittelt wurden

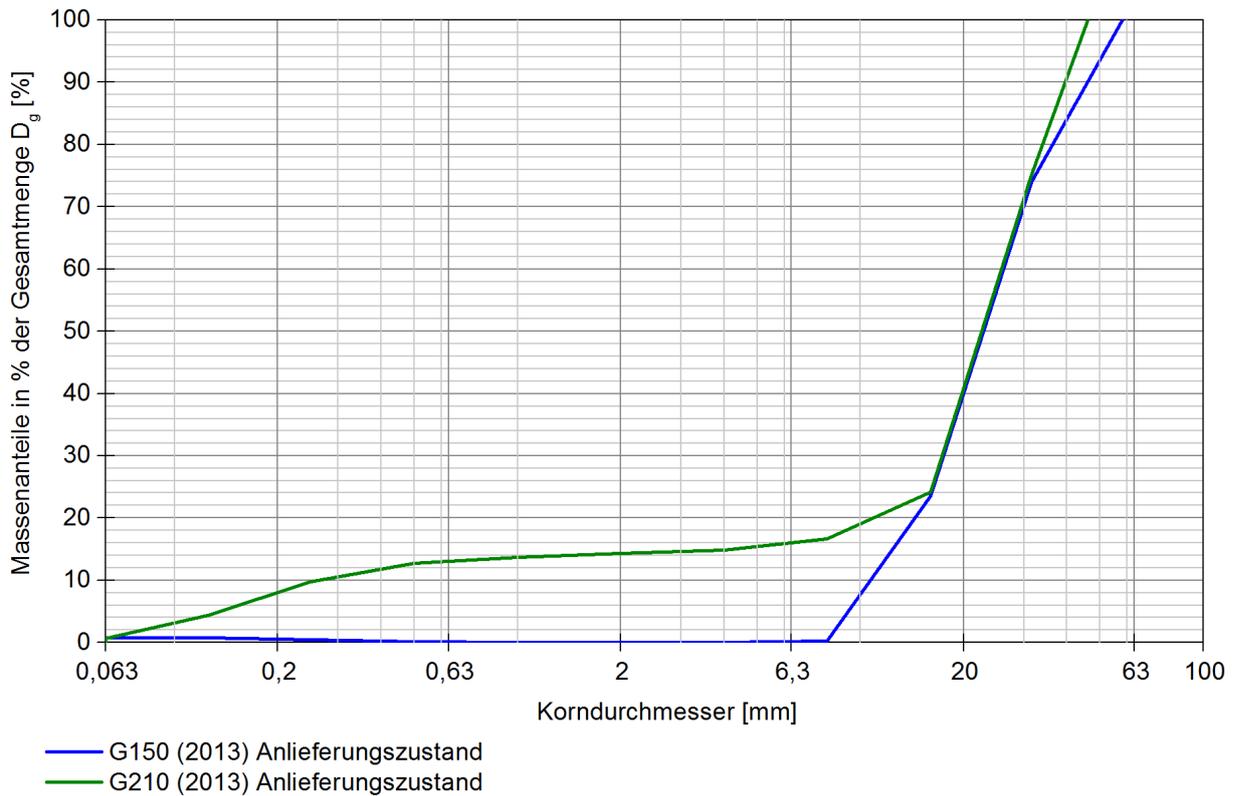


Abbildung 3.1: Sieblinien der beiden Materialtypen im Anlieferungszustand

Die Materialien wurden in den sogenannten Big Bags geliefert und in einem überdachten Bereich gelagert.

## 3.2 Versuchsprogramm

Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der beiden Materialtypen wurden am Institut Geotechnik an der Technischen Universität Wien im Rahmen einer Bachelorarbeit [27] und der vorliegenden Arbeit folgende Untersuchungen durchgeführt:

Versuche am Einzelkorn [27]:

- Bestimmung der Reindichte
- Bestimmung der Rohdichte
- Bestimmung des Porenanteils
- Einaxiale Druckversuche

Versuche am Korngemisch:

- Kompressionsversuche

- Triaxialversuche
- Dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät

Nachfolgend werden die einzelnen Versuche kurz beschrieben und die Versuchsergebnisse interpretiert.

### 3.3 Versuche am Einzelkorn [27]

#### 3.3.1 Reindichte $\rho_r$ [27]

Die Reindichte  $\rho_r$  ist die Dichte des porenbildenden Feststoffes (Glas) im Einzelkorn. Für die Bestimmung der Reindichte  $\rho_r$  wurden Glasschaumgranulatkörner zu Pulver mit einem maximalen Korndurchmesser von 0,063 mm zermahlen. Anhand des Pulvers wird die Reindichte  $\rho_r$  mit dem Kapillarpyknometer gemäß ÖNORM B 4413 bestimmt. Die ermittelten Reindichten (siehe Tab. 3.2) für beide Materialtypen liegen in der Größenordnung der Dichte von Glas ( $\rho_{Glas} = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ) [27].

Tabelle 3.2: Reindichte  $\rho_r$  je Materialtyp [27]

	G150 (2013)	G210 (2013)
Reindichte $\rho_r$	2,48 [g/cm <sup>3</sup> ]	2,47 [g/cm <sup>3</sup> ]

#### 3.3.2 Rohdichten $\rho_s$ und Porenanteile $n_s$ [27]

Die Rohdichte  $\rho_s$  stellt die Dichte des Einzelkorns (Korndichte) unter Berücksichtigung der im Einzelkorn vorhandenen Poren dar. Um die Rohdichte  $\rho_r$  zu bestimmen, wurden Glasschaumgranulatkörner zu Glasschaumprismen mit einer quadratischen Grundfläche geschliffen. Dabei wurde auf die Planparallelität der Proben geachtet. Anhand aller Seitenlängen wurde das Volumen der Prismen bestimmt. Damit der sich beim Schleifen der Prismen in der Oberfläche eingelagerte Staub die Masse  $m_s$  der Prismen nicht verfälscht, wurden die Proben gewaschen und anschließend getrocknet. Die anhand der Masse und des Volumens der Glasschaumprismen ermittelten Rohdichten  $\rho_s$  und die auf Basis der Reindichte  $\rho_r$  und der Rohdichte  $\rho_s$  berechneten Porenanteile  $n_s$  sind in Tab. 3.3 gegenübergestellt [27].

Tabelle 3.3: Rohdichten  $\rho_s$  der untersuchten Materialtypen [27]

Materialbezeichnung	Min [g/cm <sup>3</sup> ]	Max [g/cm <sup>3</sup> ]	Standardabweichung [g/cm <sup>3</sup> ]
G150 (2013)	0,304	0,34	0,012
G210 (2013)	0,294	0,639	0,102

Der Vergleich zeigt, dass der Materialtyp G210 (2013) im Mittelwert um ca. 35 % höhere Rohdichten aufweist als der Materialtyp G150 (2013), wobei die Streuung beim Materialtyp G210 (2013) wesentlich größer ist.

Tabelle 3.4: Porenanteile im Einzelkorn  $n_s$  [27]

Materialbezeichnung	Min [-]	Max [-]	Standardabweichung [-]
G150 (2013)	0,863	0,877	0,005
G210 (2013)	0,741	0,881	0,041

Auf Basis der zuvor angegebenen Werte der Roh- und Reindichte ist in Tabelle 3.4 der Porenanteil im Einzelkorn je Materialtyp angeführt. Ein Vergleich der Werte zeigt, dass der Materialtyp G150 (2013) über einen höheren Porenanteil verfügt. Der Grund für die geringere Rohdichte der Einzelkörner des Materialtyps G15(2013) wird auf den höheren Porenanteil zurückgeführt.

Anhand eines visuellen Vergleichs der Prismen konnte festgestellt werden, dass die Verteilung und Größe der Poren beim Materialtyp G150 (2013) wesentlich gleichmäßiger ist als beim Materialtyp G210 (2013).

### 3.3.3 Einaxiale Druckversuche [27]

Bei der Herstellung der Probekörper wurden die Einzelkörner mit einem Schleifstein geschliffen, wobei auf die Planparallelität der Seitenflächen geachtet wurde. Die Prismen hatten eine quadratische Grundfläche mit einer Seitenlänge von 18 mm und einer Höhe von 35 mm auf. Insgesamt wurden 10 Probekörper des Materialtyps G150 (2013) und 11 Probekörper des Materialtyps G210 (2013) hergestellt (siehe Abb. 3.2) [27].

Beim einaxialen Druckversuch handelt es sich um einen schnellen Zusammendrückungsversuch bei ungehinderter Seitendehnung ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ). Die Druckversuche wurden an einer Presse mit einem starren Laststempel an prismatischen Körpern mit den Abmessungen  $H : B = 1 : 2-2,5$  durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit [(mm/min)] des Laststempels wurde mit 1 % der Probenhöhe je Minute gewählt. Die aufgebrachte einaxiale Druckkraft  $F$  [N] und die Änderung der Probenhöhe  $\Delta_h$  [mm] wurden kontinuierlich aufgezeichnet und über die Probenfläche in eine Normalspannung umgerechnet.

Die aufgezeichneten Daten wurden in einem Druck-Stauchungs-Diagramm ( $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm) aufgetragen. Anfangshöhe  $h_0$  [mm] bezogen auf die Änderung der Probenhöhe  $\Delta_h$  ergibt die Stauchung  $\varepsilon$  [%] des Probekörpers ( $\varepsilon = \Delta_h / h_0$ ).

Der Versuch wurde gemäß ÖNORM 4415 [14] durchgeführt.

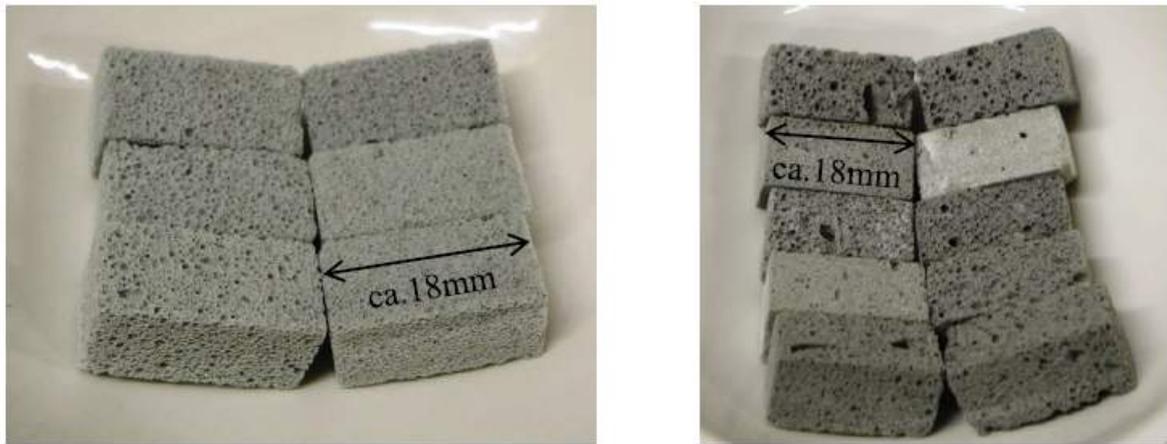


Abbildung 3.2: Probekörper; links: des Materialtyps G150 (2013), rechts: des Materialtyps G210 (2013)  
[27]

Die aufgezeichnete Kraft wurde über die Probenfläche, die über über den gesamten Versuch als konstant angenommen wurde, in eine Normalspannung umgerechnet. Die Abb. 3.3 und 3.4 zeigen die Arbeitslinien für die einzelnen Proben in Abhängigkeit des Materialtyps.

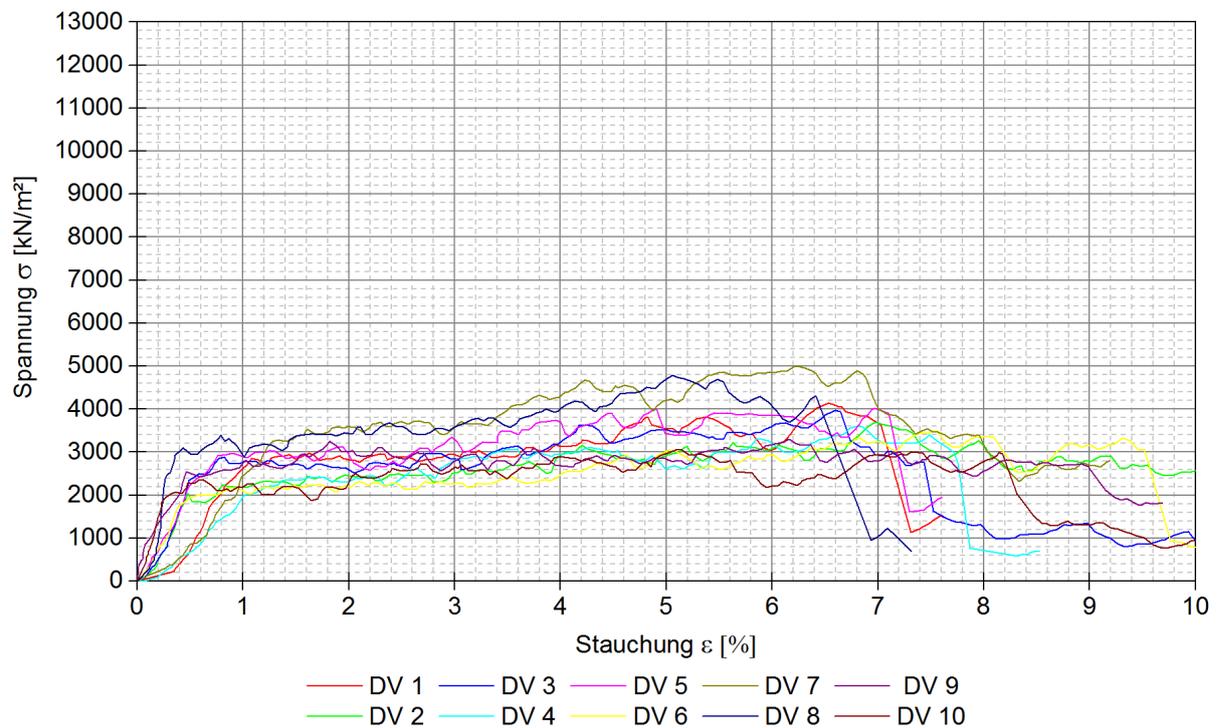


Abbildung 3.3: Druckversuche - Arbeitslinie für den Materialtyp G150 [27]

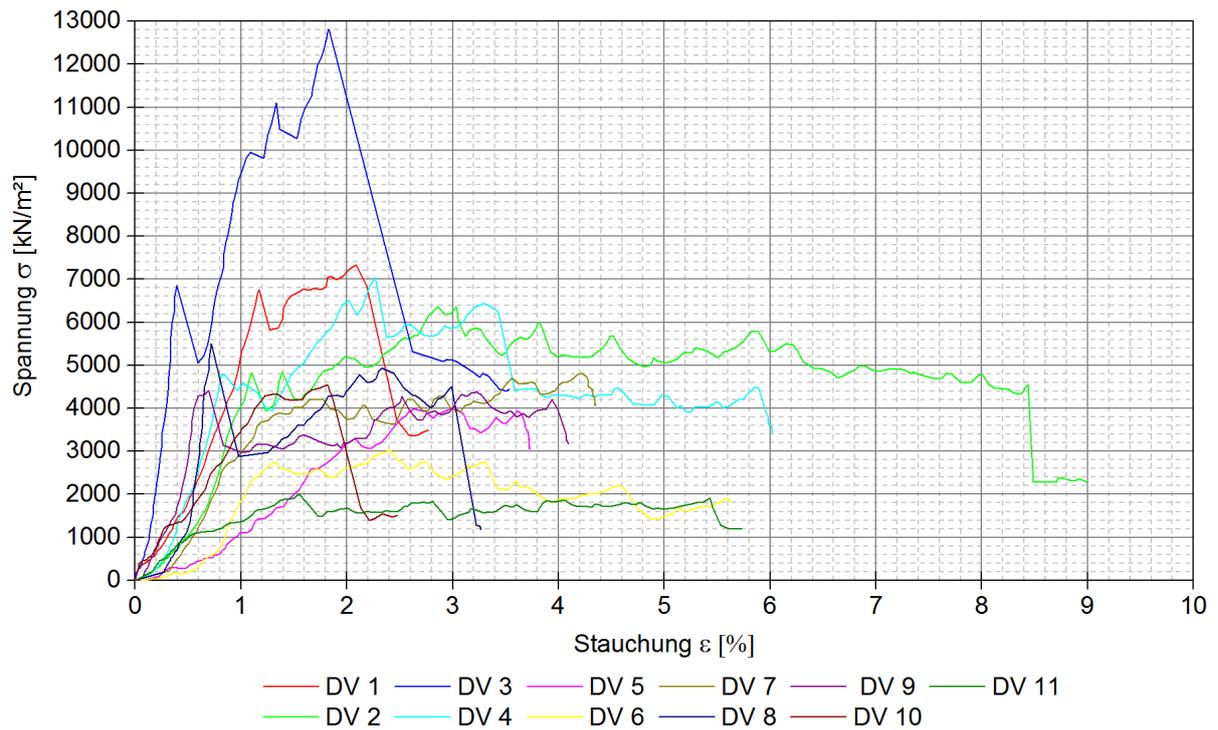


Abbildung 3.4: Druckversuche - Arbeitslinie für den Materialtyp G210 [27]

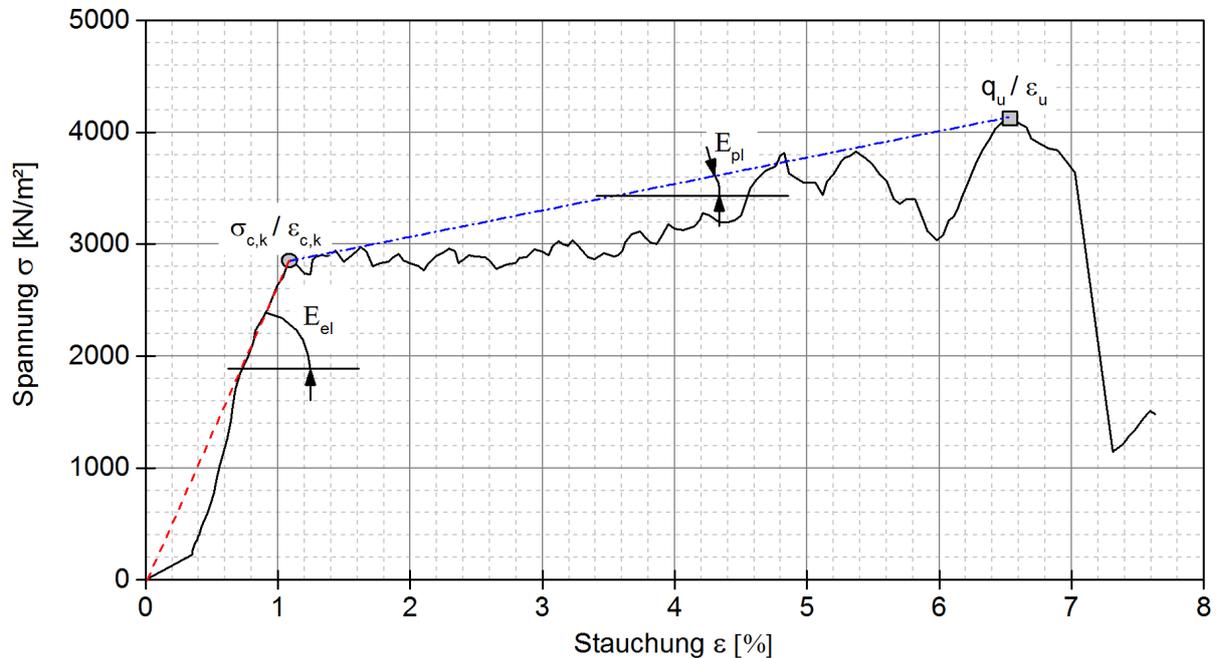


Abbildung 3.5: Probekörper vor und nach dem einaxialen Druckversuch (exemplarisch) [27]

Abb. 3.5 zeigt exemplarisch die Arbeitslinie eines prismatischen Probekörpers, welche mit folgenden Parametern charakterisiert wird:

$\sigma_{c,k}$  ..... einaxiale Druckfestigkeit  
 $\epsilon_{c,k}$  ..... Stauchung - einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$   
 $E_{el}$  ..... mittlerer Anstieg der Arbeitslinie für Spannungen  $\sigma \leq \sigma_{c,k}$   
 $q_u$  ..... Bruchfestigkeit  
 $\epsilon_u$  ..... Stauchung - Bruchfestigkeit  $q_u$   
 $E_{pl}$  ..... mittlerer Anstieg der Arbeitslinie für Spannungen  $\sigma_{c,k} \leq \sigma \leq \sigma_{c,k}$

Studener stellte anhand des Vergleichs der Arbeitslinien der Proben für beide Materialtypen fest, dass die Arbeitslinien beim Materialtyp G150 (2013) ähnliche Verläufe aufweisen, wobei diese beim Materialtyp G210 (2013) stark variieren. Der Verlauf der Arbeitslinien weist beim Materialtyp G150 (2013) bis zum Erreichen der Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  einen linearen Anstieg auf. Bei weiterer Belastung der Probekörper steigen die Dehnungen bei gleichbleibender Spannung weiter an, bis die Bruchfestigkeit  $q_u$  erreicht wird. Nach Erreichen der Bruchfestigkeit  $q_u$  fällt sie signifikant ab. Dieses Verhalten wird auf ein duktileres Materialverhalten des Materialtyps G150 (2013) zurückgeführt.

Beim Materialtyp G150 (2013) sind die Verläufe der Arbeitslinien sehr unterschiedlich. Sie weisen zwar wie beim Materialtyp G150 (2013) einen nahezu linearen Anstieg auf, jedoch ist die Neigung der einzelnen Arbeitslinien sehr unterschiedlich. Manche Arbeitslinien fallen nach Erreichen der Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  sehr stark ab, was einem spröden Materialverhalten entspricht. Manche Proben zeigen hingegen ein duktileres Materialverhalten.



Abbildung 3.6: Probekörper vor und nach dem einaxialen Druckversuch (exemplarisch) [27]

In Abb. 3.6 ist exemplarisch ein Probekörper je Materialtyp vor und nach dem Versuch abgebildet. Beim Probekörper DV2 des Materialtyps G150 (2013) ist ein typisches und gleichmäßiges Porengefüge erkennbar. Beim Versagen des Probekörpers DV 2 bildete sich ein vertikaler Riss auf der rechten Seite des Probekörpers. Der Probekörper DV 6 des Materialtyps G210 (2013) weist im Gegensatz dazu ein sehr unregelmäßiges Porengefüge auf. Die große Einzelpore im oberen Drittel des Prismas (siehe Abb. 3.6) führte zum raschen und spröden Versagen des Probekörpers. Ein für den Materialtyp G210 (2013) typisches Porenbild ist nach Studener jedoch nicht festzustellen; das Materialverhalten variiert bei den Probekörpern in Abhängigkeit des Porenanteils  $n_s$  und der Porenstruktur [27].

Tabelle 3.5: Vergleich der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche [27]

		G150 (2013)		G210 (2013)	
		Min	Max	Min	Max
$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,30	0,34	0,294	0,639
$n_s$	[-]	0,86	0,88	0,741	0,881
$\sigma_{c,k}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2011,3	3279,4	1971,2	6852,6
$\varepsilon_{c,k}$	[%]	0,4	1,5	0,4	2,08
$E_{el}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	163,7	718,4	129,26	1732,15
$q_u$	[kN/m <sup>2</sup> ]	3061,1	4984,9	1971,2	12815,19
$\varepsilon_{q,u}$	[%]	5,31	7,6	0,69	4,22
$E_{pl}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	14,2	36,4	23,6	416,4

In Tab. 3.5 sind die im Zuge der einaxialen Druckversuche ermittelten Werte als Minimal- und Maximalwerte gegenübergestellt. Ein Vergleich zeigt, dass sich die Versuchsergebnisse für den Materialtyp G210 (2013) von jenen für den Materialtyp G150 (2013) durch eine deutlich größere Bandbreite unterscheiden. Während beispielsweise der Minimalwert der Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  für beide Materialtypen ungefähr gleich groß ist, ist der Maximalwert der Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  für den Materialtyp G210 (2013) um ca. das 2-Fache höher als jener für den Materialtyp G150 (2013).

### 3.3.4 Zusammenfassung der Versuche am Einzelkorn

Die ermittelten Reindichten (siehe Tab. 3.2) für beide Materialtypen liegen in der Größenordnung der Dichte von Glas ( $\rho_{Glas} = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ) [27].

Die beiden Materialtypen G150 (2013) und G210 (2013) unterscheiden sich hauptsächlich durch die Porenstruktur ihrer Einzelkörner, sodass die einzelnen Körner des Materialtyps G150 (2013) im Gegensatz zu Materialtyp G210 (2013) einen sehr gleichmäßigen Porenanteil aufweisen. Beim Materialtyp G210 (2013) variiert der Porenanteil der Einzelkörner stärker, aber auch die Größe und Form der Poren. Die Streuung der Rohdichte (Korndichte) und der einaxialen Druckfestigkeiten der Einzelkörner wird auf diesen Umstand zurückgeführt.

## 3.4 Kompressionsversuche

### 3.4.1 Allgemeines

Der Kompressionsversuch ist ein einaxialer Druckversuch zur Untersuchung der Zusammendrückbarkeit einer Probe bei **verhinderter** Seitendehnung [20]. Mit den aus dem Kompressionsversuch resultierenden Kennwerten können u.a. die zu erwartenden Setzungen von Bauwerken ermittelt und deren zeitlicher Verlauf abgeschätzt werden [4]. Der Kompressionsversuch ist in ÖNORM B4420 [20] beschrieben.

Um die Steifemoduln  $E_{s,i}$  der beiden zur untersuchenden Materialtypen G150 (2013) und G210 (2013) zu ermitteln, wurden je Materialtyp zwei Kompressionsversuche mit zwei unterschiedlicher Intensität der Verdichtung nämlich Verdichtungsgrade zu  $V = 10\%$  und  $V = 25\%$  unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Last-Verformungsverhaltens der Proben, durchgeführt.

### 3.4.2 Probenherstellung

Die Proben wurden hergestellt, indem die Korngemische der Materialtypen G150 (2013) und G210 (2013) in den Ödometer mit einer Grundfläche von 500 mm x 500 mm und einer Höhe von 200 mm geschüttet und verdichtet wurden. Die Verdichtung erfolgte mithilfe eines Proctorhammers und einer Kunststoffplatte als lastverteilende Platte, auf welcher die Stöße ausgeführt wurden (siehe Abb. 3.7). Je nach Verdichtungsgrad kamen zwei verschiedene Proctorhämmer mit einer Fallmasse von 2,5 kg und 4,5 kg zum Einsatz, wobei der Erstgenannte für die Versuche mit einem Verdichtungsgrad von  $V = 10\%$  verwendet wurde. Bei der Verdichtung wurde festgestellt, dass es bei jedem Stoß des Proctorhammers auf die Kunststoffplatte zu einer seitlichen Verdrängung der einzelnen Körner kommt. Dies wird auf die geringe Dichte des GSG zurückgeführt.

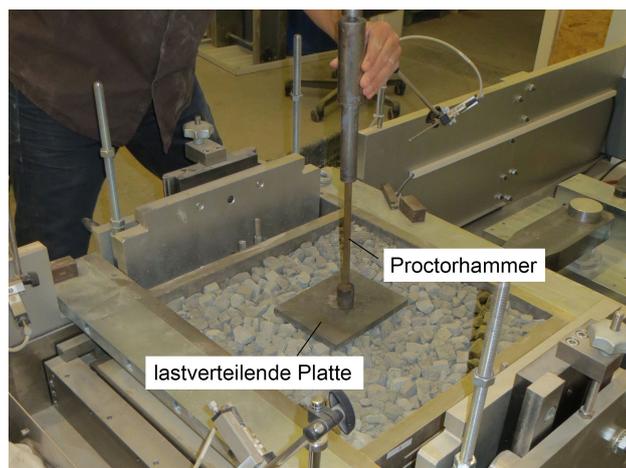


Abbildung 3.7: Verdichtung der Probe mittels Proctorhammer und lastverteilernder Platte

Im Zuge der Verdichtung der Proben wurde auf eine planparallele Ausführung der Ober- und Unterseite geachtet. Eine Übersicht zu den Proben mit den jeweiligen Verdichtungsgraden  $V$ , Anfangsprobenhöhen  $h_0$  und den Dichten  $\rho_d$  kann Tab. 3.6 entnommen werden.

Tabelle 3.6: Übersicht zu den Probekörpern der Kompressionsversuche

Probenbezeichnung	Materialtyp	Verdichtungsgrad V [%]	Anfangsprobenhöhe $h_0$ [mm]	Dichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
G150 (2013) V10	G150 (2013)	10	173,5	0,178
G210 (2013) V10	G210 (2013)	10	174,5	0,305
G150 (2013) V25	G150 (2013)	25	145,8	0,225
G210 (2013) V25	G210 (2013)	25	144,4	0,398

Ein Vergleich der in Tab. 3.6 angeführten Werte für die Dichte  $\rho_d$  zeigt, dass diese sehr unterschiedlich sind. Um diesen Sachverhalt zu erklären, wird zunächst der Porenanteil für alle Probekörper ermittelt. Der Porenanteil  $n$  ist definiert als Porenvolumen bezogen auf das Gesamtvolumen und berechnet sich zu [4]:

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_r} \quad (3.1)$$

mit:

$\rho_d$  ... Trockendichte (siehe Tab. 3.6)

$\rho_r$  ... Reindichte (siehe Tab. 3.2)

Die nach der Formel 3.1 ermittelten Porenanteile  $n$  für die Probekörper wurden in Tab. 3.7 mit den dazugehörigen Dichten gegenübergestellt.

Tabelle 3.7: Porenanteile  $n$  mit den dazugehörigen Trockendichten  $\rho_d$  für alle Probekörper

Probenbezeichnung	Trockendichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Porenanteil [-]
G150 (2013) V10	0,178	0,928
G210 (2013) V10	0,305	0,877
G150 (2013) V25	0,225	0,909
G210 (2013) V25	0,398	0,839

Ein Vergleich zeigt, dass die Trockendichte  $\rho_d$  für den selben Verdichtungsgrad  $V$  je nach Materialtyp stark variiert. Diese ist beim Materialtyp G210 (2013) um ca. 75 % höher als beim Materialtyp G150 (2013). Die Ursache dafür wird auf die höhere Rohdichte  $\rho_s$  (siehe Tab. 3.2) beim Materialtyp G210 (2013) zurückgeführt.

### 3.4.3 Versuchsdurchführung und Dokumentation der Probeverformung

Am Versuchsbeginn wurde zur Sicherstellung eines vollständigen Kontaktes des Laststempels mit der Probenoberseite eine Spannung von 5 kN/m<sup>2</sup> aufgebracht. Nach Abklingen der Verformungen zufolge der Spannung von 5 kN/m<sup>2</sup> wurden die Sensoren zur Messung der Probenverformungen nulliert. Die Belastung der

Proben bei der Erstbelastung erfolgte in 8 Laststufen, wobei die Spannung innerhalb einer Laststufe mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $20 \text{ kN/m}^2$  je Minute gesteigert wurde. Die Steigerung der Spannung von Laststufe zu Laststufe im Zuge der Erstbelastung erfolgte bis Erreichen einer Laststufe von  $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$  in Schritten von  $20 \text{ kN/m}^2$ . Danach bis zur Höchstspannung von  $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$  in Schritten von  $100 \text{ kN/m}^2$ . Nach Erreichen der Höchstspannung wurde die Spannung mit einer Geschwindigkeit von  $20 \text{ kN/m}^2$  je Minute auf jene Spannung der Vorbelastung von  $\sigma = 5 \text{ kN/m}^2$  reduziert. Die Wiederbelastung erfolgte in vier Schritten von  $100 \text{ kN/m}^2$  bis zur Höchstspannung von  $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ .

Die Steigerung der Spannung auf das Niveau der nächsten Laststufe erfolgte nach Abklingen der Verformungen der jeweiligen Laststufe. Dies ist gemäß ÖNORM B4420 [20] Punkt 6.2.2 entweder bei nicht automatisiertem Versuchsablauf nach 24 Stunden oder bei automatisiertem Versuchsablauf, wenn die Zusammendrückungsgeschwindigkeit der Probe  $\leq 0,5 \text{ ‰} / \text{h}$  der Anfangsprobenhöhe  $h_0$  beträgt, der Fall.

Die jeweiligen Spannungen der Laststufen der Erst- und Wiederbelastung sind in Tab. 3.8 aufgelistet.

Tabelle 3.8: Übersicht zu den Belastungsstufen der Kompressionsstufen

Laststufe	Spannung $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Anmerkung
0	5	Vorbelastung
1	20	Erstbelastung
2	40	Erstbelastung
3	60	Erstbelastung
4	80	Erstbelastung
5	100	Erstbelastung
6	200	Erstbelastung
7	300	Erstbelastung
8	400	Erstbelastung
9	5	Entlastung
10	100	Wiederbelastung
11	200	Wiederbelastung
12	300	Wiederbelastung
13	400	Wiederbelastung

Die Abb. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 zeigen die Last, die vertikalen Verformungen und die 13 Laststufen in Abhängigkeit von der Zeit je Versuch.

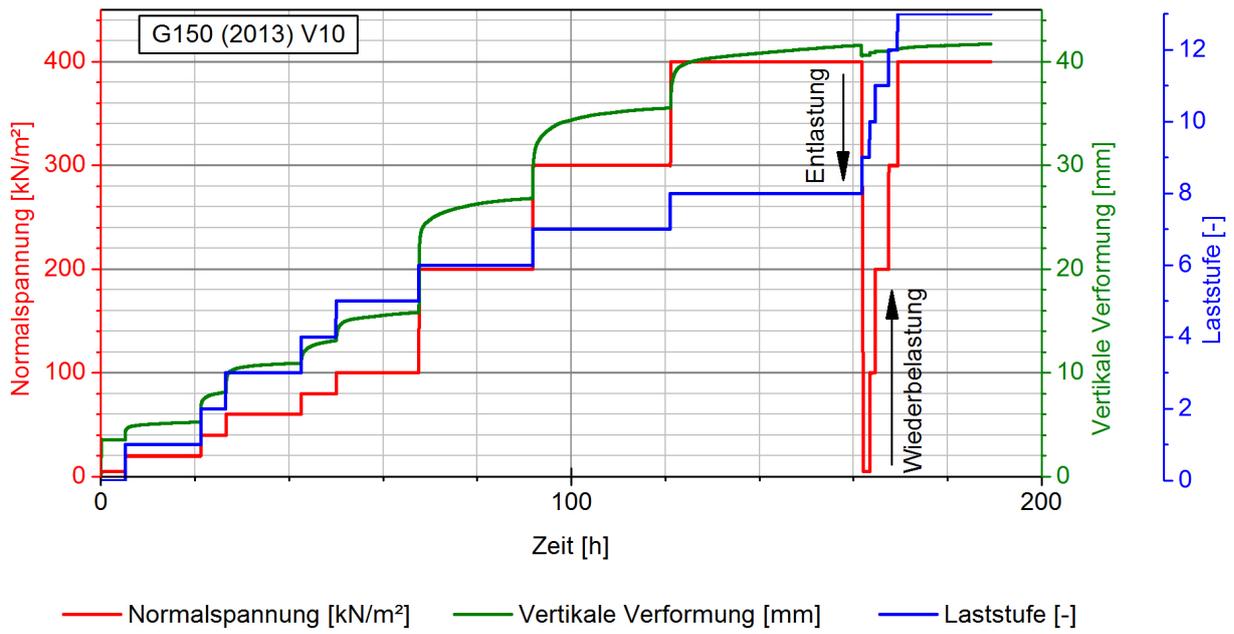


Abbildung 3.8: Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G150 (2013) V10 in Abhängigkeit der Zeit

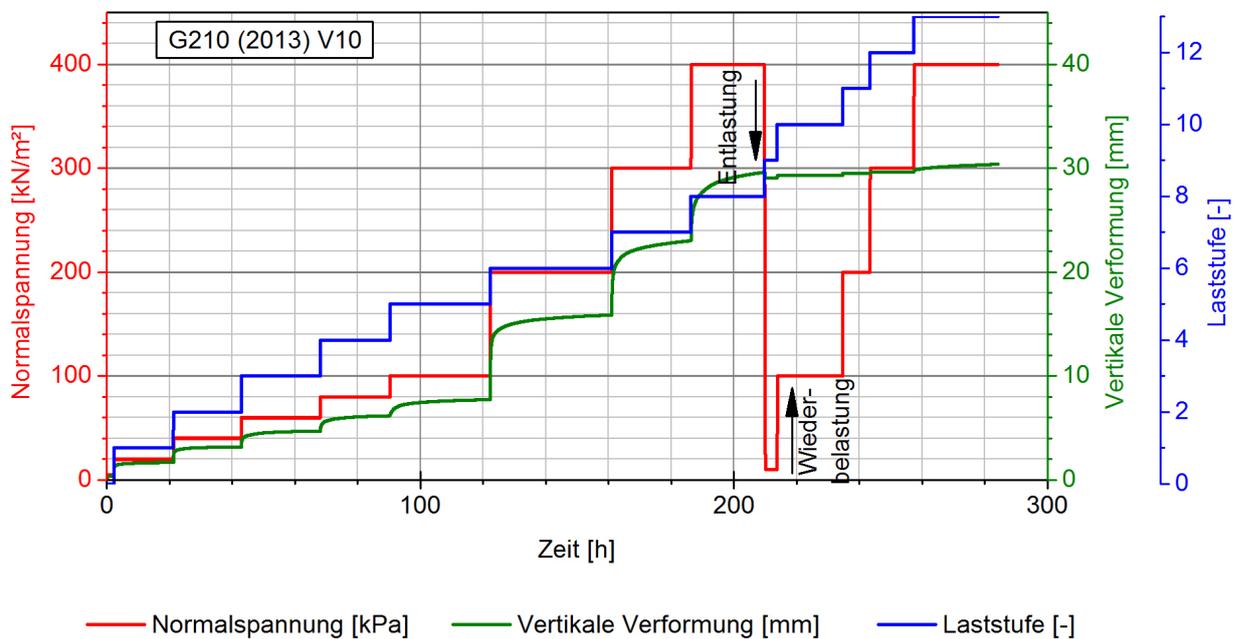


Abbildung 3.9: Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G210 (2013) V10 in Abhängigkeit der Zeit

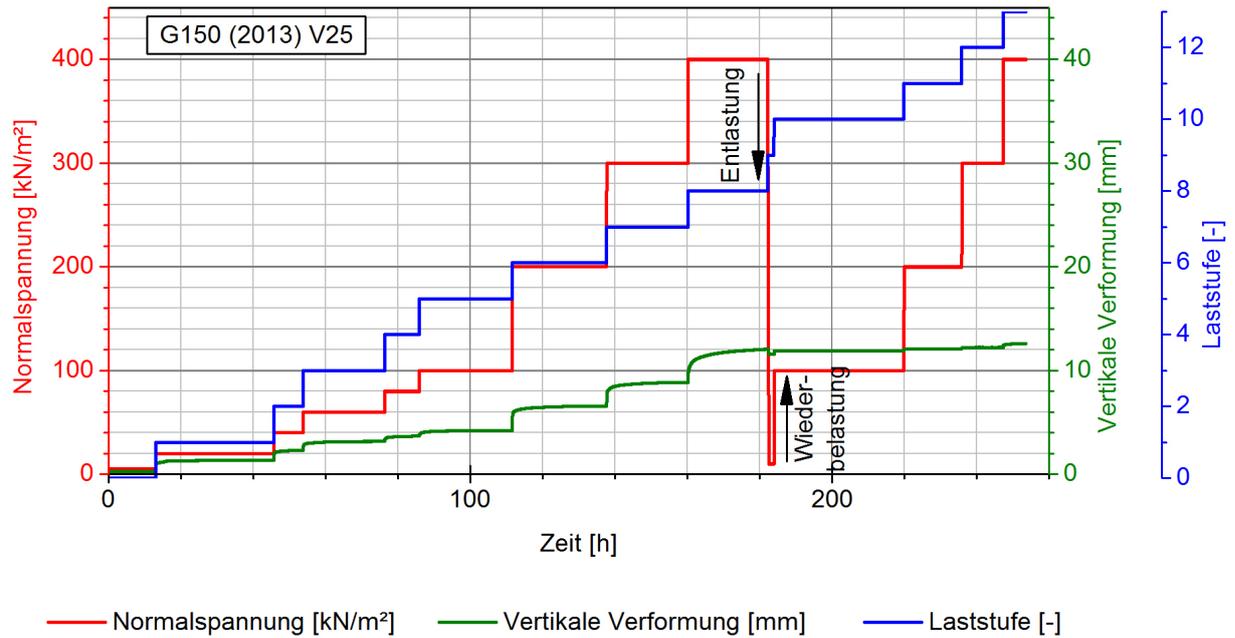


Abbildung 3.10: Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G150 (2013) V25 in Abhängigkeit der Zeit

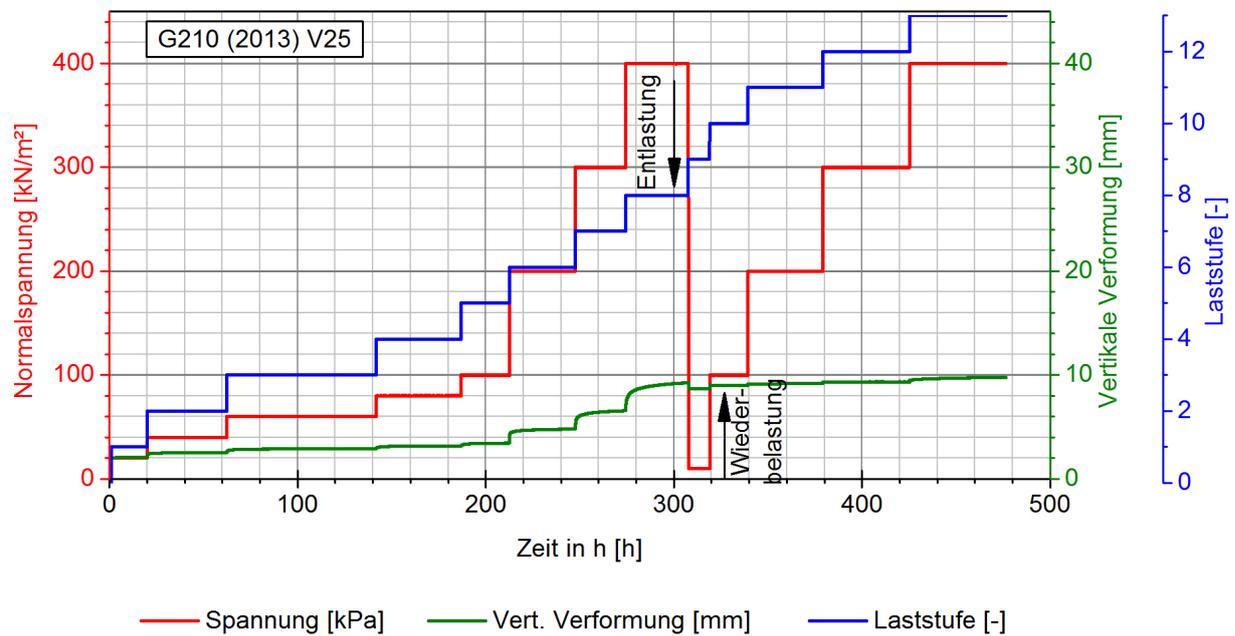


Abbildung 3.11: Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G210 (2013) V25 in Abhängigkeit der Zeit

### 3.4.4 Auswertung der Versuche

Für die Auswertung der Versuche wurden die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  und Wiederbelastung  $E_{S2}$  ermittelt. In Tab. 3.9 wurden die Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  exemplarisch für den Versuch G150 (2013) V10 mit einer Anfangshöhe von  $h_0 = 173,5$  mm (siehe Tab. 3.6) für alle 13 Laststufen aufgelistet.

Tabelle 3.9: Stauchungen und Steifemoduln für die Probe G150 (2013) V10

	Laststufe	Normalspannung $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Verformung s [mm]	Stauchung $\varepsilon = (\Delta h/h) \times 100$ [%]	Steifemodul $E_S = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon$ [MN/m <sup>2</sup> ]
ERSTBELASTUNG	0	0,0	0,0	0,0	$E_{S1,0 \div 5} = 0,2$
	1	5	3,56	2,05	$E_{S1,5 \div 20} = 1,6$
		20	5,25	3,02	
	2	20	5,25	3,02	$E_{S1,20 \div 40} = 1,2$
		40	8,14	4,69	
	3	40	8,14	4,69	$E_{S1,40 \div 60} = 1,2$
		60	10,94	6,31	
	4	60	10,94	6,31	$E_{S1,60 \div 80} = 1,6$
		80	13,11	7,56	
	5	80	13,11	7,56	$E_{S1,80 \div 100} = 1,3$
		100	15,84	9,13	
	6	100	15,84	9,13	$E_{S1,100 \div 200} = 1,6$
		200	26,83	15,46	
7	200	26,83	15,46	$E_{S1,200 \div 300} = 2,0$	
	300	35,55	20,49		
8	300	35,55	20,49	$E_{S1,300 \div 400} = 3,3$	
	400	40,73	23,48		
ENTLASTUNG	9	400	40,73	23,48	-
		5,1	40,65	23,43	
WIEDERBELASTUNG	10	5,1	40,65	23,43	$E_{S2,5 \div 100} = 69,2$
		100	40,89	23,57	
	11	100	40,89	23,57	$E_{S2,100 \div 200} = 147$
		200	41,01	23,63	
	12	200	41,01	23,63	$E_{S2,200 \div 300} = 157,1$
		300	41,12	23,70	
	13	300	41,12	23,70	$E_{S2,300 \div 400} = 29,2$
		400	41,70	24,04	

Im Zuge der Auswertung der Kompressionsversuche wurden die Arbeitslinien (Spannungs-Stauchungs-Diagramme) dargestellt, die in Abb. 3.12 wiedergegeben wurden. Weiteres wurden die Steifemoduln  $E_{S1}$

und  $E_{S2}$  in Abb. 3.13 dargestellt. Beim Vergleich der Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  ist erkennbar, dass sich bei einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  höhere Steifemoduln  $E_{S1}$  ergeben. Außerdem sind die Steifemoduln  $E_{S1}$  für den selben Verdichtungsgrad  $V$  bei Probekörpern aus G210 (2013) größer als jene aus G150 (2013). In 3.3.3 wurde erwähnt, dass der Materialtyp G210 (2013) eine höhere einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  aufweist als der Materialtyp G150 (2013). Die Steifemoduln  $E_{S1}$  der beiden Materialtypen zeigen, dass der Materialtyp G210 (2013) mit einer höheren einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  höhere Steifemoduln aufweist als der Materialtyp G150 (2013) mit einer niedrigeren einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$ .

Ein weiterer Vergleich zeigt, dass die Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  um ein vielfaches größer als jene der Erstbelastung  $E_{S1}$  sind. Dies wird damit erklärt, dass sich im Zuge der Erstbelastung eine Verzahnung der einzelnen Körner einstellt und sich diese gegenseitig verspannen. Durch die Reduzierung der Spannung nach der Erstbelastung kommt es daher zu einer geringfügigen Entlastung der Probekörper. Bei einer Wiederbelastung der Probekörper verhalten sich diese steifer, weshalb sich höhere Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  ergeben.

Anhand der Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  ist noch zu erkennen, dass diese bei Steigerung der Spannung von  $300 \text{ kN/m}^2$  auf  $400 \text{ kN/m}^2$  sehr stark abnehmen.

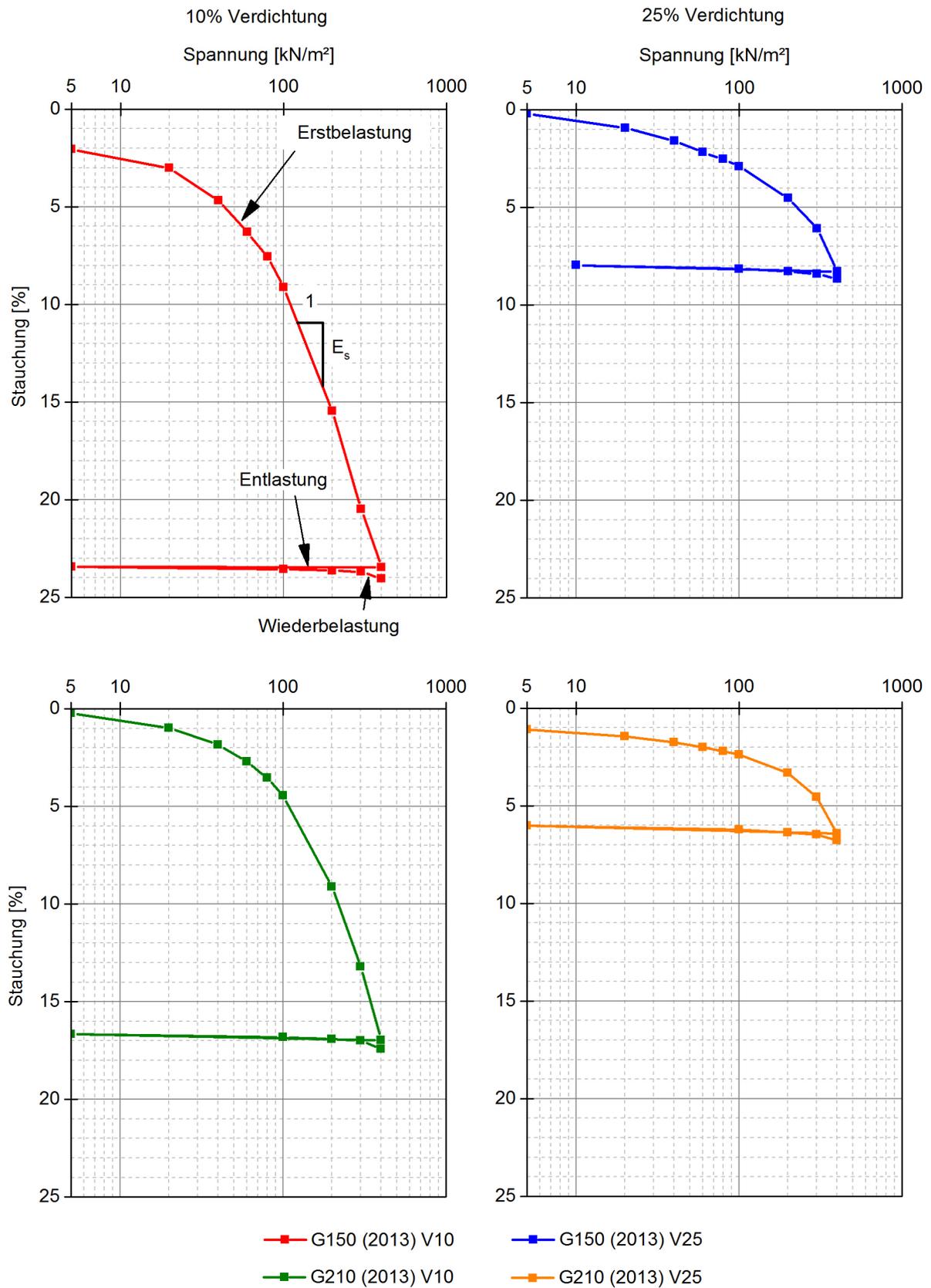


Abbildung 3.12: Spannungs-Stauchungs-Diagramme der Proben

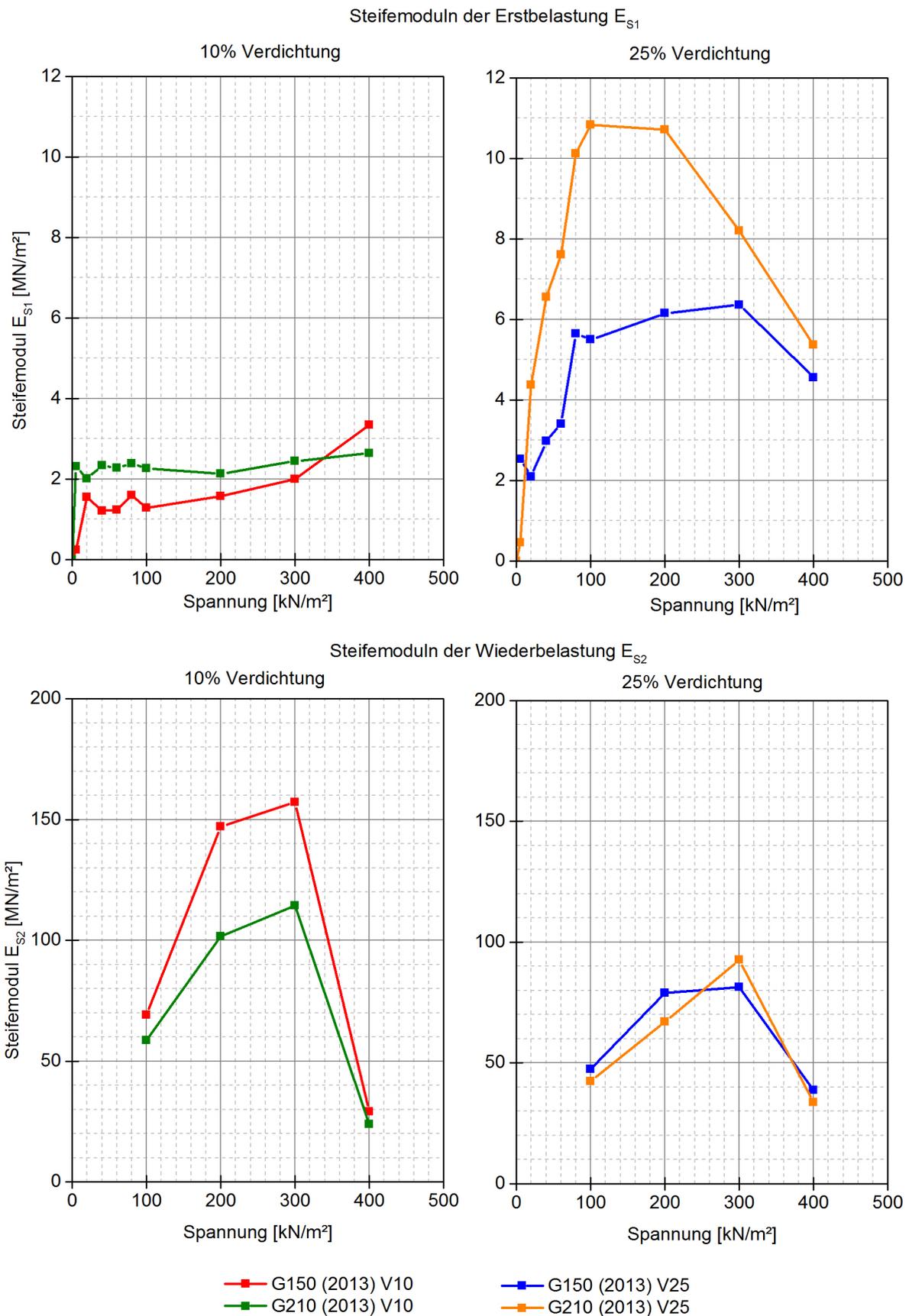


Abbildung 3.13: Zusammenhang zwischen den Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  sowie der Wiederbelastung  $E_{S2}$  und der Normalspannung  $\sigma$  für verschiedene Probekörper

Für die Beurteilung des zeitabhängigen Lastverformungsverhalten wurde je Laststufe der Kriechbeiwert  $C_\alpha$  für die Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$  je Probe ermittelt. Die Berechnung des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$  erfolgte am linearen Teil der Zeit-Stauchungs-Linie in halblogarithmischer Skalierung.

In Tab. 3.10 sind die Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  der Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  angeführt. Der Kriechbeiwert  $C_\alpha$  wird exemplarisch für die Probe G150 (2013) V10 in Gleichung 3.2 mit den Werten aus der Tabelle 3.10 berechnet.

$$C_\alpha = \tan \alpha = \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \log t} = \frac{0,71}{1,30} = 0,55\% \quad (3.2)$$

Tabelle 3.10: Ermittlung der Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  der Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  je Probe

Probenkurzbezeichnung	Zeit [min]			Stauchung [%]			Kriechbeiwert $C_\alpha$ [%]
	$t_{\text{Anfang}}$	$t_{\text{Ende}}$	$\Delta \log t$	$\varepsilon_{i,\text{Anfang}}$	$\varepsilon_{i,\text{Ende}}$	$\Delta \varepsilon$	$\Delta \varepsilon / \Delta \log t$
G150 (2013) V10	20	400	1,30	0,51	1,22	0,71	0,55
G150 (2013) V25	20	400	1,30	0,22	0,34	0,12	0,1
G210 (2013) V10	20	400	1,30	0,32	0,72	0,4	0,31
G210 (2013) V25	20	400	1,30	0,07	0,16	0,09	0,07

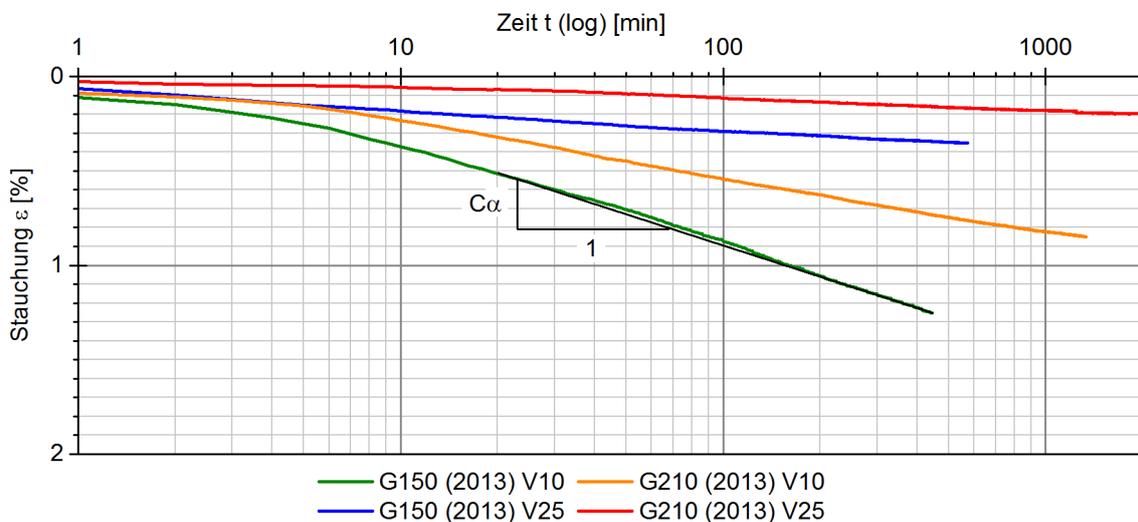


Abbildung 3.14: Zeit-Stauchungs-Diagramm für die Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  je Probe

Ein Vergleich der in Tab. 3.10 angeführten Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  für die Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  zeigt, dass der Verdichtungsgrad V eine wichtige Rolle für die Größe des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$  spielt. Bei einem höheren Verdichtungsgrad V ist eine geringe Zunahme der Stauchung  $C_\varepsilon$  über die Zeit festzustellen, dadurch ergeben sich kleinere Kriechbeiwerte  $C_\alpha$ . Außerdem kann ein Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit mit der Größe des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$  hergestellt werden; für denselben Verdichtungsgrad V ergeben sich beim Materialtyp G210 (2013) mit höheren einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$

kleinere Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  als beim Materialtyp G150 (2013) mit niedrigeren einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$ .

In Tab. 3.11 sind die Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  der Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$  angeführt und in Abb. 3.14 das Zeit-Stauchungs-Diagramm je Probe dargestellt.

Tabelle 3.11: Ermittlung der Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  für  $\sigma=300 \text{ kN/m}^2$

Probenbezeichnung	Zeit [min]			Stauchung [%]			Kriechbeiwert $C_\alpha$ [%]
	$t_{\text{Anfang}}$	$t_{\text{Ende}}$	$\Delta \log t$	$\varepsilon_{i,\text{Anfang}}$	$\varepsilon_{i,\text{Ende}}$	$\Delta \varepsilon$	$\Delta \varepsilon / \Delta \log t$
G150 (2013) V10	20	1753	1,94	2,54	5,03	2,49	1,28
G150 (2013) V25	20	1342	1,83	1,03	1,57	0,54	0,30
G210 (2013) V10	20	1511	1,88	2,1	4,1	2	1,06
G210 (2013) V25	20	1596	1,90	0,6	1,22	0,62	0,33

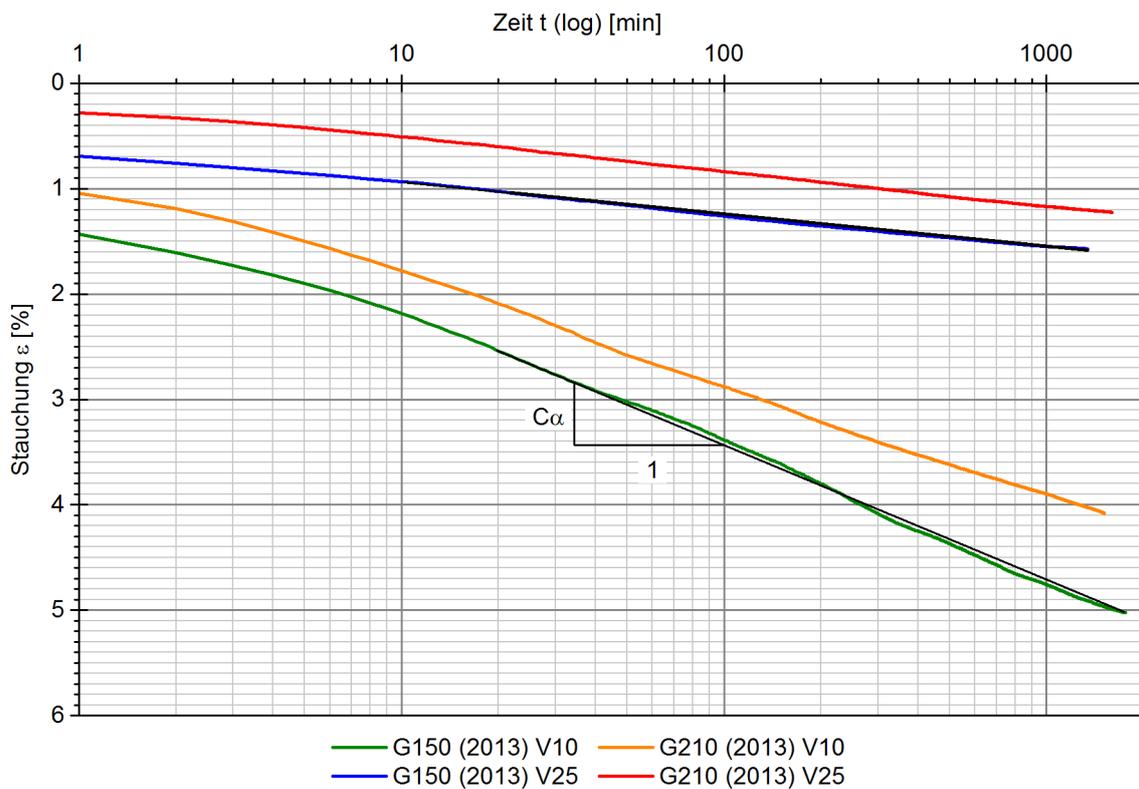


Abbildung 3.15: Zeit-Stauchungs-Diagramm für die Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$  je Probe

Ein Vergleich der in Tab. 3.11 angeführten Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  für die Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  zeigt den oben beschriebenen Sachverhalt: der Verdichtungsgrad  $V$  spielt eine wichtige Rolle für die Größe des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$ . Bei einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  ist eine geringe Zunahme der Stauchung  $C_\varepsilon$  über die Zeit festzustellen, dadurch ergeben sich kleinere Kriechbeiwerte  $C_\alpha$ . Außerdem kann ein Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit mit der Größe des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$  hergestellt werden; für den selben Verdichtungsgrad  $V$  ergeben sich beim Materialtyp G210(2013) mit

höheren einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  kleinere Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  als beim Materialtyp G150 (2013) mit niedrigeren einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$ .

In Tab. 3.12 werden die Kriechbeiwerte für alle Proben gegenübergestellt.

Tabelle 3.12: Vergleich der Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  für die Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$

Probenkurzbezeichnung	Kriechbeiwert $C_\alpha$ [%]	
	für $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$	für $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$
G150 (2013) V10	0,55	1,28
G150 (2013) V25	0,1	0,30
G210 (2013) V10	0,3	1,06
G210 (2013) V25	0,07	0,33

Anhand der in Tab. 3.12 gegenübergestellten Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  für die Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$  ist festzustellen, dass der Verdichtungsgrad V eine wichtige Rolle für die Größe des Kriechbeiwertes spielt, wobei bei Proben mit einem höherem Verdichtungsgrad V die Stauchung  $\varepsilon$  gegenüber Proben mit einem geringeren Verdichtungsgrad V geringfügig zunimmt. Dadurch sind die Kriechbeiwerte bei einem niedrigeren Verdichtungsgrad V größer bzw. bei einem höheren Verdichtungsgrad V kleiner. Weiters zeigt sich, dass bei einer größeren Belastung die Kriechbeiwerte dementsprechend größer werden.

In Kapitel 3.3.3 wurde erwähnt, dass die einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  beim Materialtyp G210 (2013) höher sind als beim Materialtyp G150 (2013). Der Vergleich der Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  zeigt, dass bei Proben aus dem Materialtyp G210 (2013) mit einer höheren einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  kleinere Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  festzustellen sind als bei den Proben aus dem Materialtyp G150 (2013) mit einer niedrigeren einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$ . Somit wird ersichtlich, dass die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  einen Einfluss auf das zeitabhängige Last-Verformungsverhalten der Proben aus GSG hat.

## 3.5 Triaxialversuche

### 3.5.1 Allgemeines

Beim Triaxialversuch handelt es sich um einen zylinder- und axialsymmetrischen Druckversuch an kreiszylindrischen homogenen Probekörpern (DIN 18137-2) [13]. Verwendung findet der Triaxialversuch vorrangig, um die Scherfestigkeit von kreiszylindrischen Probekörpern zu bestimmen. Aufgrund der horizontal wirkenden Spannungen ( $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$ ) auf die Probe spricht man auch von einem Druckversuch mit seitlich behinderter Ausdehnung [4].

Der kreiszylindrische Probekörper wird zunächst in der Triaxialzelle durch einen allseitigen Flüssigkeitsdruck unter einem räumlichen Spannungszustand ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) gesetzt (siehe Abb. 3.16). Danach wird der Probekörper zum Versagen gebracht, indem bei konstant gehaltenem Zelldruck ( $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{konst.}$ ) die axiale vertikale Spannung  $\sigma_1$  durch einen verschiebbaren Laststempel gesteigert wird [24].

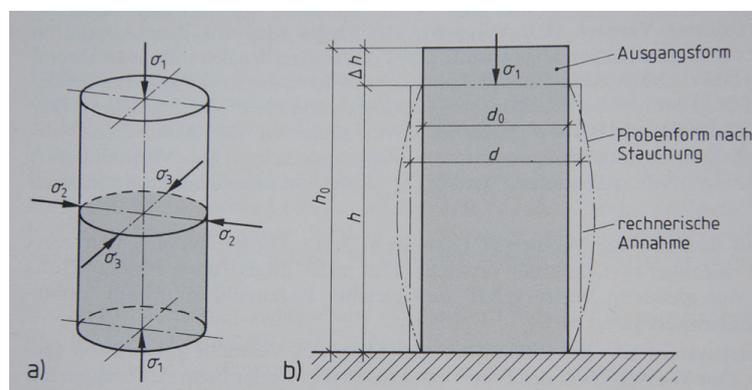


Abbildung 3.16: Probekörper a) Spannungen b) Änderungen der Probeabmessung während des triaxialen Druckversuchs [25]

Die Scherfestigkeit wird anhand der beiden Scherparametern, dem Reibungswinkel  $\varphi$  und der Kohäsion  $c$ , beschrieben. Die Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  werden ermittelt, indem in der Regel bei drei Probekörpern mit unterschiedlichen Seitendrücken  $\sigma_2 = \sigma_3$  die vertikale Hauptspannung  $\sigma_1$  bis zum Bruch der Proben gesteigert wird. Die beim Bruch der Proben vorliegenden räumlichen Spannungszustände werden im Mohr'schen Diagramm in Form von Spannungskreisen dargestellt. Die Schergerade ergibt sich durch die Tangente an diese Kreise, an der die Kohäsion  $c$  und Reibungswinkel  $\varphi$  abgelesen werden [19].

Um die Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  der beiden zur untersuchenden Materialtypen G150 (2013) und G210 (2013) zu ermitteln, wurden je Materialtyp vier Versuche mit unterschiedlichen Seitenspannungen von  $\sigma_3 = 0$  (einachsialer Druckversuch), 30, 60, 120 kN/m<sup>2</sup> durchgeführt und anschließend die Versuchsergebnisse miteinander verglichen und interpretiert.

### 3.5.2 Probenherstellung

Aufgrund der verwendeten Triaxialzelle im Erdbaulaboratorium der TU Wien können ausschließlich Proben mit einem Durchmesser von 100 mm untersucht werden. Daher wurde die Kornverteilungslinie der

Kornmische für die Herstellung der Probekörper im Vergleich zur Kornverteilungslinie der jeweiligen Materialtypen im Anlieferungszustand adaptiert. Der maximale Korndurchmesser für beide Materialtypen wurde mit 16 mm gewählt. Die Abb. 3.17 zeigt die Sieblinie des jeweiligen Materialtyps vor und nach der Adaptierung.

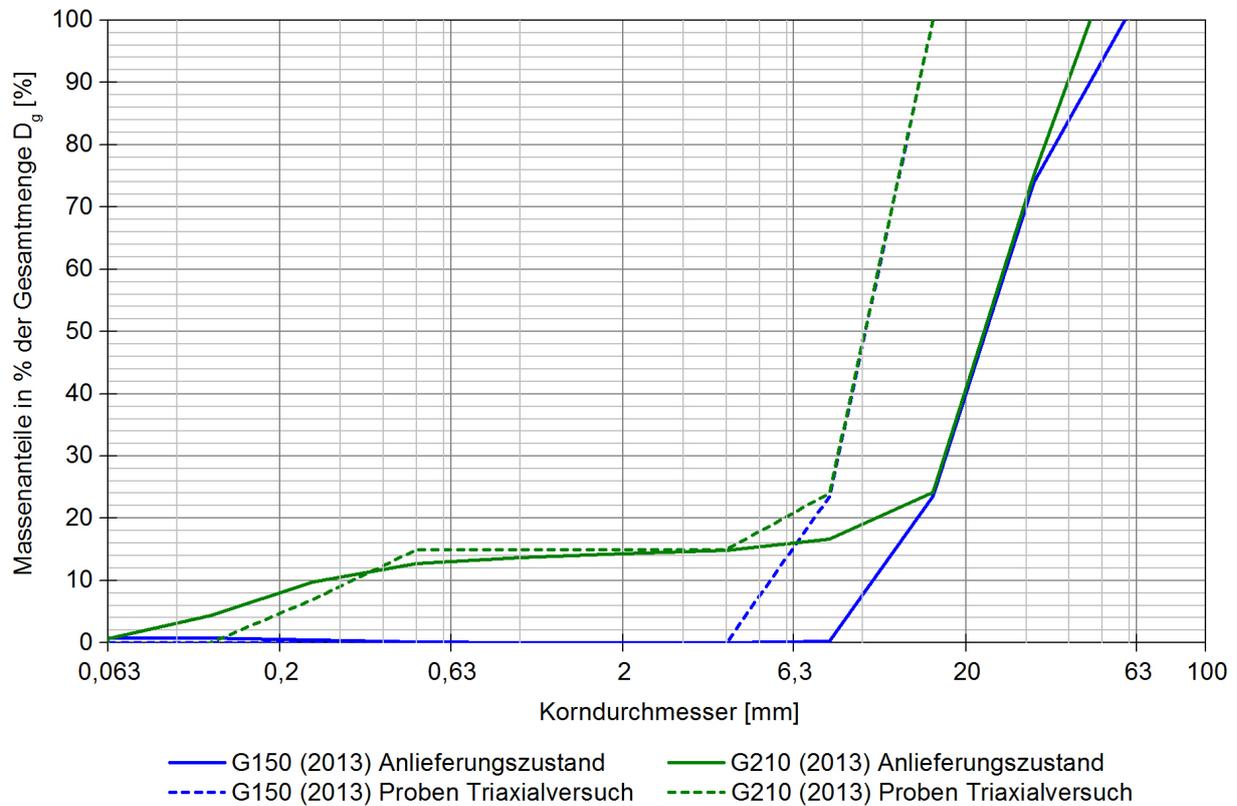


Abbildung 3.17: Kornverteilungslinien der Materialien G150 (2013) und G210 (2013) im Anlieferungszustand sowie der Probekörper der Triaxialversuche

Die Kornverteilungslinie der Proben des Materialtyps G210 (2013) besteht aus den in Tab. 3.13 angeführten Kornfraktionen. Die Kornfraktionen wurden durch Brechen der Körner des Materials G210 (2013) im Anlieferungszustand hergestellt. Hierfür wurde ein Backen-Brecher verwendet.

Tabelle 3.13: Massenanteile je Kornfraktion für G150 (2013) und G210 (2013)

Kornfraktion	G150 (2013)		G210 (2013)	
	Massenanteil je Kornfraktion [%]	Massenanteil je Kornfraktion [g]	Massenanteil je Kornfraktion [%]	Massenanteil je Kornfraktion [g]
0,125 - 0,25	-	-	7	37,9
0,25 - 0,5	-	-	8	91,2
4 - 8	23,5	91,2	9	48,7
8 - 16	76,5	297,1	76	411,3
$\Sigma$	100	388,3	100	541,2

Abb. 3.18 zeigt exemplarisch alle Kornfraktionen des Korngemisches der Proben des Materialtyps G210 (2013) in vier gleich großen Schüsseln nebeneinander.

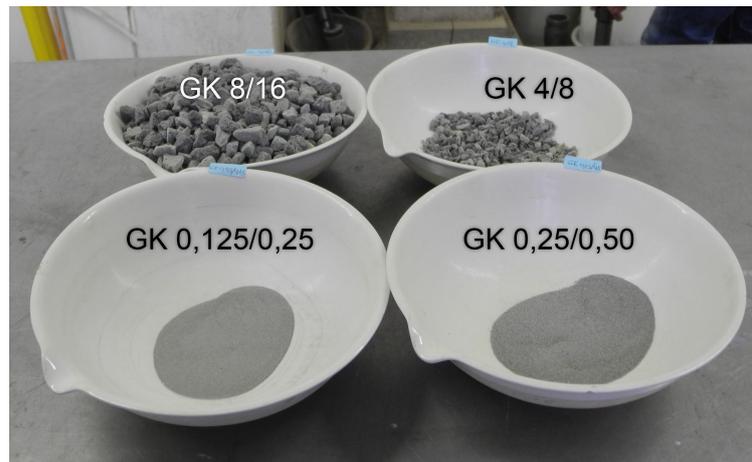


Abbildung 3.18: Kornfraktionen zur Herstellung der Proben des Materials G210 (2013)

Für die Herstellung der Probekörper wurden die jeweiligen Kornfraktionen befeuchtet und gleichmäßig vermischt und anschließend die Korngemische in eine zylindrische Form lageweise geschüttet und verdichtet. Durch den lageweisen Einbau konnte ein homogener Probekörper hergestellt werden. Zur Sicherstellung der Planparallelität der Ober- und Unterseite der Proben wurden diese mit Gips entlang der zylindrischen Form abgeglichen (siehe Abb. 3.19)



Abbildung 3.19: links: Mit Gips abgeglichene Oberseite der Probe in der zylindrischen Form, rechts: fertiger Probekörper

Anschließend wurden die Proben im Frostraum ca. 24 Stunden in der zylindrischen Form gelagert. Durch das Frieren des anhafteten Wassers auf den Kornoberflächen bzw. des Wassers zwischen den Körnern erreichten die Proben eine ausreichende Festigkeit, um über diese eine Membran überziehen zu können bzw. in die Triaxialzelle einzubauen. Tab. 3.14 gibt einen Überblick über die Probekörperabmessungen mit den dazugehörigen Massen für beide Materialtypen, die unterschiedliche Dichten aufweisen. Der Grund für unterschiedliche Dichten wird auf die unterschiedlichen Porenanteile und auf die unterschiedlichen Korndichten zurückgeführt.

Tabelle 3.14: Probekörperabmessungen und die dazugehörigen Massen der Probekörper

Materialtyp	Durchmesser $d_0$ [cm]	Fläche $A_0$ [cm <sup>2</sup> ]	Höhe $h_0$ [cm]	Volumen $V_0$ [cm <sup>3</sup> ]	Masse $m_d$ [g]	Dichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
G150 (2013)	10,06	79,54	19,22	1528,71	376,1	0,246
G210 (2013)	10,06	79,54	19,22	1528,71	541,2	0,354

Um ein Beschädigen der Gummimembran durch die scharfkantigen Körner zu verhindern, wurden die Proben mit einem Vlies umwickelt und während des Auftauens der Proben diese durch Aufbringen eines Unterdruckes innerhalb der Probe stabilisiert. Es wurde eine 0,7 mm dicke wasserdichte Gummimembran mit einem Durchmesser von 100 mm und 300 mm Höhe verwendet und zum Schluss die Triaxialzelle zusammengebaut und mit Wasser gefüllt.

Abb. 3.20 zeigt exemplarisch eine Probe in Triaxialzelle für einen einaxialen Druckversuch.



Abbildung 3.20: Probe in Triaxialzelle für einen einaxialen Druckversuch

### 3.5.3 Versuchsdurchführung

Es wurden je Materialtyp vier Versuche durchgeführt. Die jeweiligen Seitenspannungen  $\sigma_3$  je Versuch sind in Tabelle 3.15 angeführt.

Tabelle 3.15: Seitenspannung  $\sigma_3$  je Versuch und Materialtyp G150 (2013) & G210 (2013)

Versuch	$\sigma_3$	Anmerkung
1	0 kN/m <sup>2</sup>	einaxialer Druckversuch
2	30 kN/m <sup>2</sup>	
3	60 kN/m <sup>2</sup>	
4	120 kN/m <sup>2</sup>	

Die Proben wurden bis zum Abklingen der Verformungen mit einem hydrostatischen (isotropen) Spannungszustand ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) beansprucht und anschließend alle Proben kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 0,1 % der Probenhöhe pro Minute bei konstanter Seitenspannung  $\sigma_2 = \sigma_3$  vertikal gestaucht. Die hierfür notwendige vertikale Spannung wurde aufgezeichnet. Beim Versagen der Proben oder beim Erreichen einer Stauchung von  $\varepsilon_1 = 25$  % wurde der Versuch beendet.

### 3.5.4 Auswertung der Versuche

In Abb. 3.21 und 3.22 sind die Arbeitslinien der Proben des Materialtyps G150 (2013) und G150 (2013) grafisch dargestellt. Dafür wurden die im Laufe der Versuche aufgezeichneten vertikalen Spannungen  $\sigma_1$  über die vertikalen Dehnungen  $\varepsilon_1$  aufgetragen.

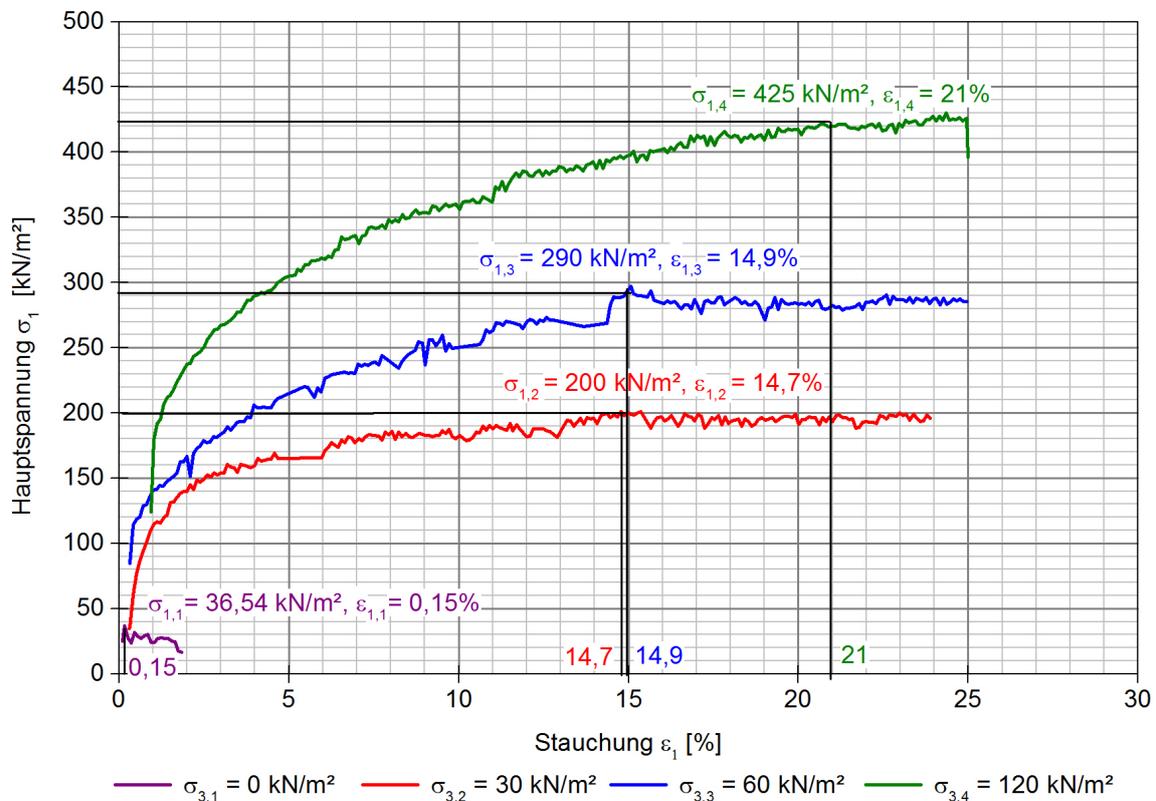


Abbildung 3.21: Arbeitslinien der Proben des Materialtyps G150 (2013)

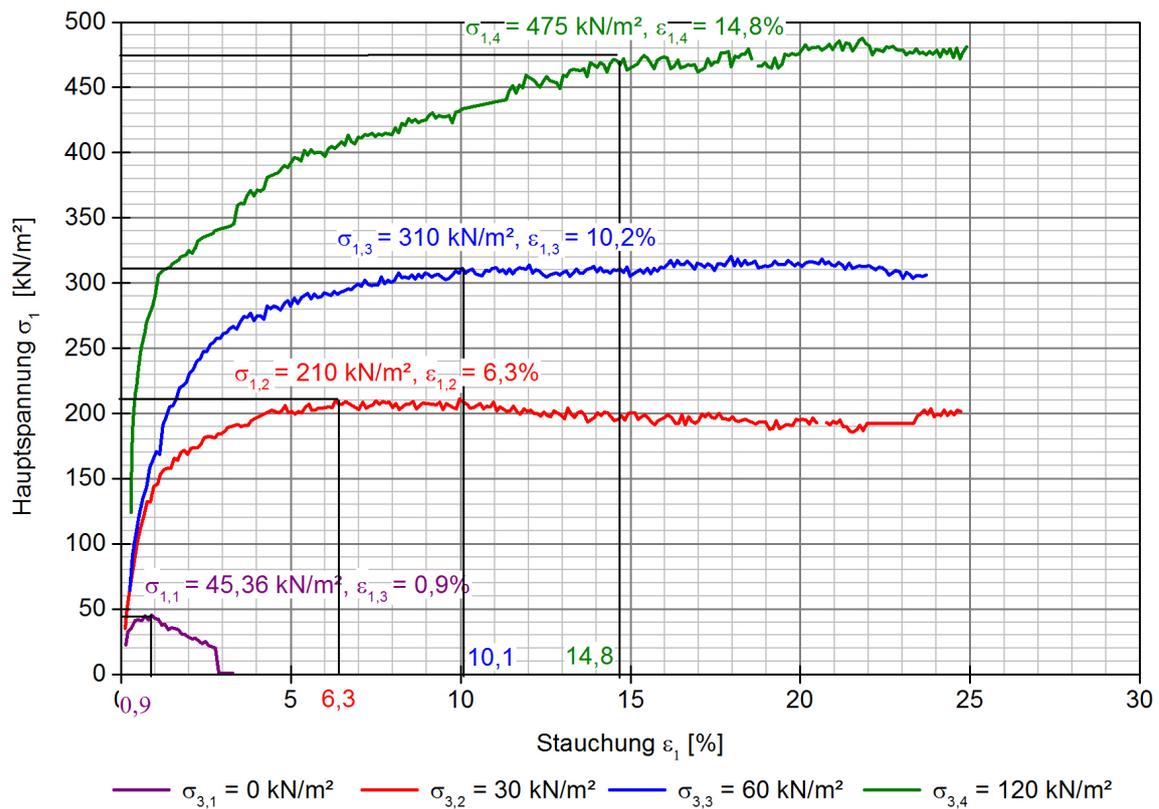


Abbildung 3.22: Arbeitslinien der Proben des Materialtyps G210 (2013)

Als Ergebnis konnte mit Ausnahme des Versuchs ohne Seitenspannung (einaxialer Druckversuch) bei allen drei Versuchen ab einem bestimmten Wert  $\varepsilon_1$  ein Fließen der Proben beobachtet werden, wobei die Stauchungen  $\varepsilon_1$  bei nahezu gleichbleibenden Spannungen  $\sigma_1$  zunahm. Somit kann der Versagensmechanismus als duktil bezeichnet werden.

Die Spannungen  $\sigma_{1,f}$ , bei denen der Bruch der Proben eintrat, wurden in den jeweiligen Arbeitslinien der Abb. 3.21 und 3.22 gekennzeichnet und in Tab. 3.16 gegenübergestellt.

Tabelle 3.16: Vergleich der Bruchspannungen und der Bruchdehnungen

Seiten- spannung $\sigma_3$ [kN/m <sup>2</sup> ]	G150 (2013)		G210 (2013)	
	Bruch- spannung $\sigma_{1,f}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Bruch- stauchung $\varepsilon_{1,f}$ [%]	Bruch- spannung $\sigma_{1,f}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Bruch- stauchung $\varepsilon_{1,f}$ [%]
0	36,54	0,16	45,36	0,9
30	200	14,7	210	6,3
60	290	14,9	310	10,1
120	425	21	475	14,8

Zunächst wurden anhand des Spannungszustandes beim Bruch der jeweiligen Proben die Mohr'schen Span-

nungskreise ermittelt und diese im jeweiligen p-q-Diagramm dargestellt, wobei p dem hydrostatischen und q dem deviatorischen Spannungsanteil entspricht.

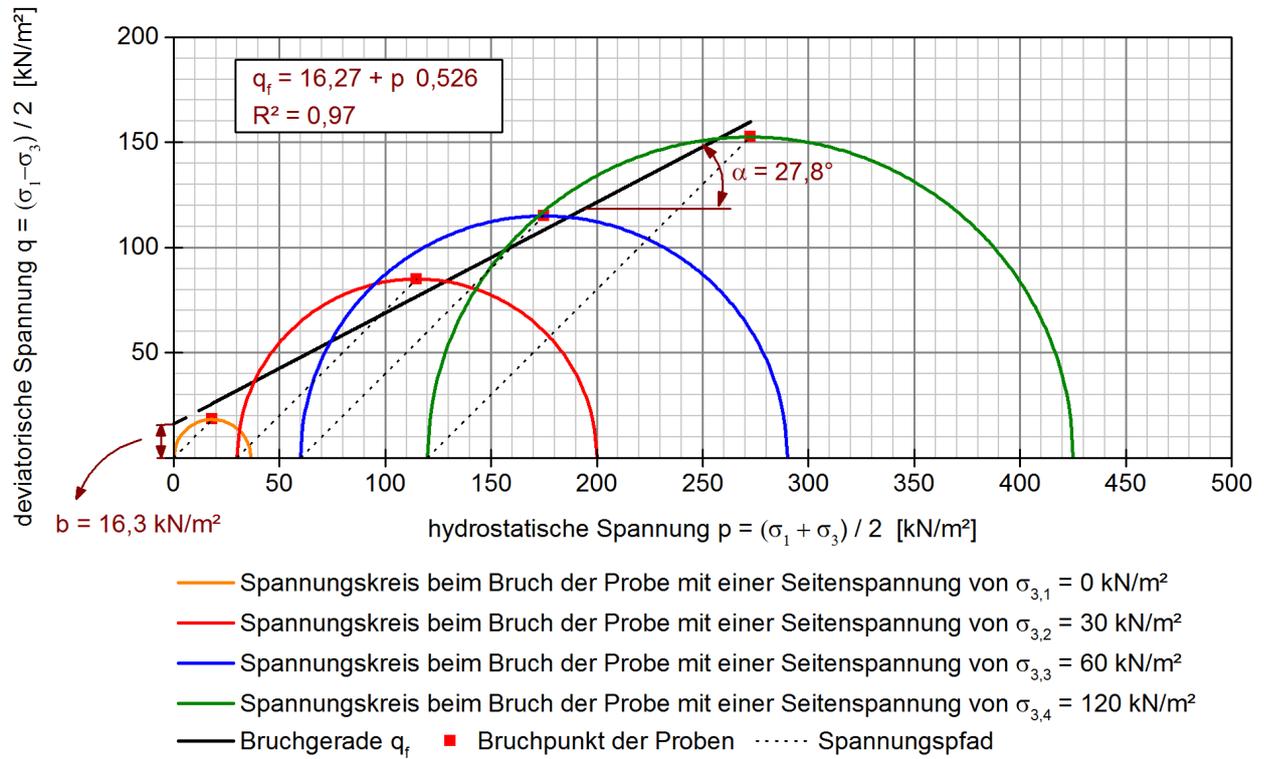


Abbildung 3.23: p-q-Diagramm der Proben des Materialtyps G150 (2013)

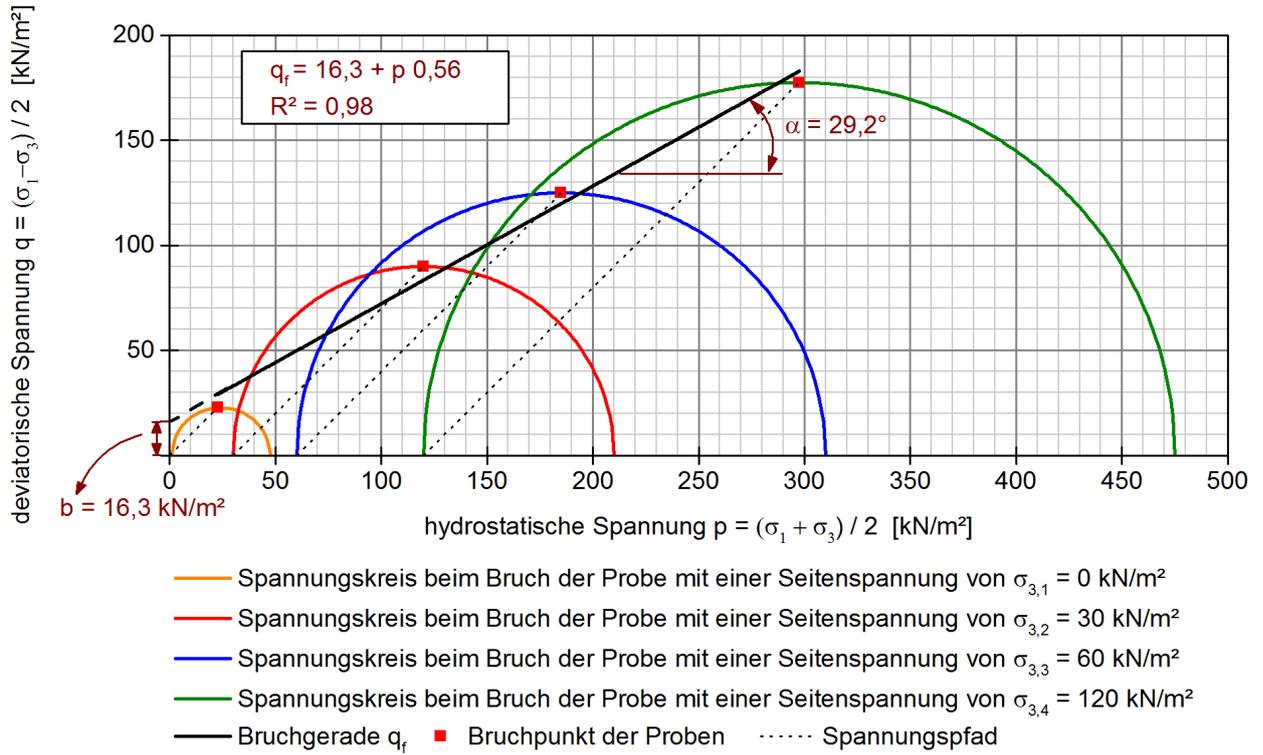


Abbildung 3.24: p-q-Diagramm der Proben des Materialtyps G210 (2013)

Als Ausgleichsgerade der Bruchpunkte wurde die Bruchgerade (=  $q_f$ -Linie) mittels linearer Regression ermittelt, welche durch die Parameter  $b$  und  $\alpha$  definiert werden. Die Bruchgerade wird als  $K_f$ -Linie (siehe Abb. 3.25) bezeichnet, wobei f im Index für „failure“ steht [4].

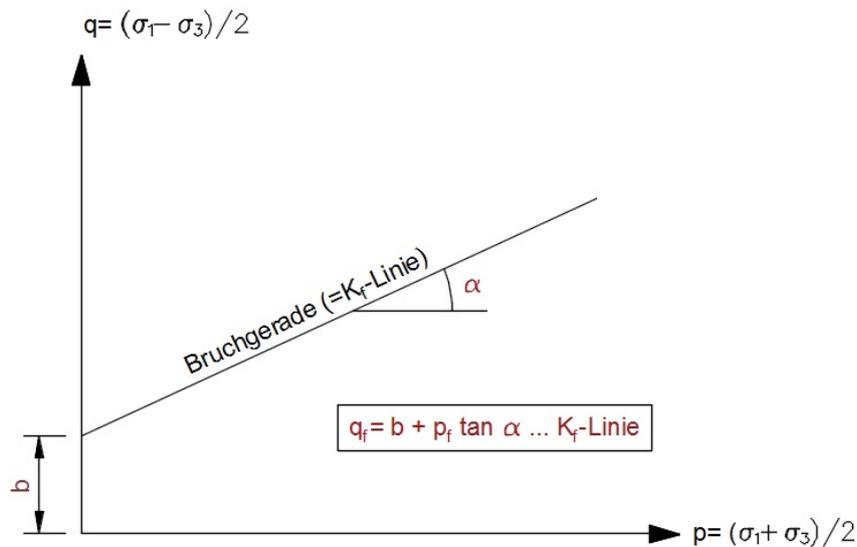


Abbildung 3.25: Darstellung des Versagenskriteriums im p-q-Diagramm [4]

Die Bruchgerade (=  $q_f$ -Linie) wird nach Gleichung 3.3 definiert [4]:

$$q_f = b + p_f \tan \alpha \quad (3.3)$$

Die Umrechnung ergibt:

$$q_f = c \cos \varphi + p \sin \varphi \quad (3.4)$$

mit:

$$b = c \cdot \cos \varphi$$

$$\tan \alpha = \sin \varphi$$

Die auf diese Weise ermittelten Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  für alle Proben sind in Tab. 3.17 angeführt.

Tabelle 3.17: Parameter  $\alpha$  und  $b$  und die daraus abgeleiteten Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  je Materialtyp

Materialtyp	$\alpha$ [°]	$\varphi$ [°]	$b$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]
G150 (2013)	27,8	31,8	16,3	19,1
G210 (2013)	29,2	34,0	16,3	19,7

Für die Verzahnungskohäsion  $c$  kann zwischen den beiden Materialtypen nahezu kein Unterschied festgestellt werden. Jedoch ist der Reibungswinkel  $\varphi$  für den Materialtyp G210 (2013) etwas größer als jener des Materialtyps G150 (2013) (siehe Tab. 3.17). Die Ursache dafür wird auf die höhere einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Materialtyps G210 (2013) zurückgeführt. Weiteres ist noch festzustellen, dass beim Materialtyp G210 (2013) bereits bei geringeren Stauchungen ein Fließzustand erreicht wird. Es wird vermutet, dass dies ebenfalls auf die höhere einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Materialtyps G210 (2013) zurückzuführen ist.

## 3.6 Dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät

### 3.6.1 Allgemeines

Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (LFG) ist ein Feldversuch zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  von Böden bzw. ungebundenen Schüttmaterialien im gesamten Erd- und Grundbau [3]. Er eignet sich zur Verdichtungskontrolle und zur Beurteilung der Tragfähigkeit des Untergrundes und von einzelnen Schüttlagen [4].

Das Leichte Fallgewichtsgerät ist leicht transportier- und bedienbar. Es können sowohl während des Baubetriebes als auch in engen Arbeitsräumen Messungen durchgeführt werden. Aufgrund der kurzen Versuchsdauer (ca. 3 min./Messstelle) wird eine hohe Versuchsanzahl bei geringem Gesamtaufwand ermöglicht, wodurch das Erdbauwerk umfassend beurteilt werden [11], [4].

### 3.6.2 Beschreibung des Leichten Fallgewichtsgerätes

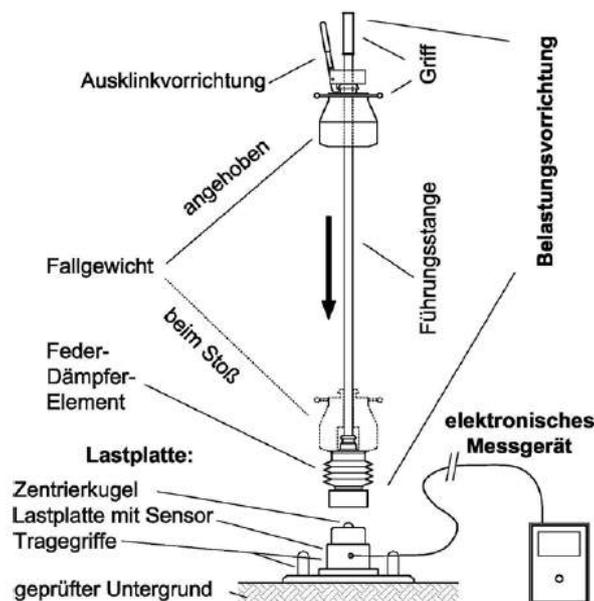


Abbildung 3.26: Komponenten des Leichten Fallgewichtsgerätes [11]

Das Leichte Fallgewichtsgerät besteht aus drei Komponenten [10], [11]:

- **Kreisrunde Lastplatte:** Diese weist einen Durchmesser von 30 cm und eine Masse von 15 kg auf. Die Lastplatte verfügt über eine ebene Unterseite, auf der oberen Seite befindet sich eine mittig angebrachte Zentrierkugel, die zum mittigen Belastungseintrag auf die Lastplatte dient. Unterhalb der Zentriervorrichtung ist ein Beschleunigungssensor angeordnet.
- **Belastungsvorrichtung:** Diese besteht aus einem Fallgewicht mit einer Masse von 10 kg, einer Führungsstange aus hartverchromten Stahl, einem Feder-Dämpfer-Element bestehend aus 17 vorgespannten Tellerfedern und aus einer Ausklinkvorrichtung.

- **Elektronische Messeinheit**, mit welcher der in der Lastplatte eingebaute Beschleunigungssensor verbunden ist. Die Signale des Beschleunigungssensors werden mittels eines im Gerät integrierten Mikroprozessors zu Plattenbewegungen und damit zu Verformungen gerechnet.

Sowohl der Aufbau und die Geometrie der einzelnen Komponenten des Leichten Fallgewichtsgerätes als auch die Versuchsführung und die Auswertung des Versuches sind in RVS 08.03.04 „Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches“ geregelt [11].

### Standardisierte Versuchsdurchführung und Auswertung

Bei der Versuchsdurchführung wird die kreisförmige Lastplatte eben und vollflächig auf die zu prüfende Stelle gelegt, die Belastungsvorrichtung zentrisch aufgesetzt und das elektronische Messgerät mit dem in der Lastplatte eingebauten Sensor verbunden. Das Fallgewicht, welches im angehobenen Zustand in der Ausklinkvorrichtung gehalten und nach dem Ausklinken kugelgelagert nahezu reibungsfrei entlang der Führungsstange geführt wird, tritt auf das Feder-Dämpfer-Element auf. Durch den Aufprall wird die Lastplatte mit einem definierten Impuls belastet.

Bei der Auswertung werden mittels des im elektronischen Messgerät (siehe Abb. 3.26) integrierten Mikroprozessors durch zweifache Integration der Beschleunigungen die maximale Plattenverschiebung und damit die Verformungen des zu prüfenden Planums ermittelt, welche zu einem Messwert, nämlich dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$ , führen [11]. Bei der standardisierten Versuchsdurchführung wird die kreisförmige nahezu starre Platte kraftschlüssig auf das zu prüfende Planum gelegt. Es werden drei Vorbelastungsstöße durchgeführt, um ein sattes Aufliegen der Platte zu gewährleisten. Bei den drei darauffolgenden Stößen werden mithilfe des elektronischen Meßgerätes die max. Plattenverschiebungen  $z_{1,max}$ ,  $z_{2,max}$ ,  $z_{3,max}$  je Stoß bestimmt. Das arithmetische Mittel  $z_{max}$  aus den drei gemessenen Maximalverschiebungen ( $z_{1,max}$ ,  $z_{2,max}$ ,  $z_{3,max}$ ) bildet die Basis zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$ . Die Auswertung des dynamischen Lastplattenversuches erfolgt nach der Gleichung 3.5 [10] :

$$E_v = 1,5 r \frac{\Delta \sigma}{\Delta s} \quad (3.5)$$

mit

r Plattenradius (= 15 cm)

$\Delta \sigma$  das Maximum der mittleren Druckspannung unter der Lastplatte

$\Delta s$  Plattenverschiebung in mm

Das Maximum der mittleren Druckspannung unter der Lastplatte  $\Delta \sigma$  wird mit  $100 \text{ kN/m}^2$  angenommen. Somit ergibt sich der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  unter Berücksichtigung der Gleichung 3.5 für eine Lastplatte mit einem Durchmesser von 30 cm zu:

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{max}} \quad (3.6)$$

mit:

- $E_{vd}$  Dynamischer Verformungsmodul [ $\text{MN/m}^2$ ]  
 $z_{max}$  Mittelwert der maximalen Lastplattenverschiebungen [mm]

Somit zeigt sich, dass in Gleichung 3.6 die im Nenner stehende gemessene mittlere Maximalverschiebung  $z_{max}$  letztendlich bei der Bestimmung vom dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  die Beurteilungsgrundlage ist [3].

### 3.6.3 Untersuchungen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät an GSG-Proben

Anhand der im Erdbaulaboratorium der TU Wien durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät wurde der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  der GSG-Proben bestimmt. Außerdem wurde untersucht, ob der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät als Verdichtungskontrolle der eingebauten GSG-Schichten anwendbar ist. Dafür wurden von Steurer im Zuge einer Dissertation [Steurer, unveröffentlicht] und dem Verfasser dieser Arbeit dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät an Proben aus zwei verschiedenen Materialtypen G150 (2013) und G210 (2013) durchgeführt. Dabei variieren die Probenhöhe  $H$  zw. 28 cm (1-lagig) und 50 cm (2-lagig) und der Verdichtungsgrad zw. 10 % und 25 %.

Folgend werden die Probenherstellung, Versuchsauswertung und Interpretation der Ergebnisse zusammengefasst.

### 3.6.4 Versuchsdurchführung ohne Auflastung um die Lastplatte

### 3.6.5 Probenherstellung

Die Versuche wurden in einem Versuchsbehälter, welcher auf dem Kellerfußboden lagerte, durchgeführt. Die Maße des Versuchsbehälters betragen  $l \mid b \mid h = 1,0 \text{ m} \mid 1,0 \text{ m} \mid 0,7 \text{ m}$ . Die aus Schalungsplatten hergestellten Seitenwände wurden seitlich durch eine Aussteifung mit Stahlprofilen nahezu unverschiebbar gelagert. In diesem Versuchsbehälter erfolgte die Herstellung der Probekörper.



Abbildung 3.27: Versuchsbehälter mit situierten Erddruckdosen zur Durchführung von dynamischen Lastplattenversuchen

Es wurden zur Messung der vertikalen und der horizontalen Spannungen sowohl an einer Seitenwand als auch am Boden des Versuchsbehälters Erddruckdosen EH bzw. EV positioniert (siehe Abb. 3.30), um damit während der dynamischen Lastplattenversuche die Lastausbreitung innerhalb des Probekörpers ermitteln zu können. Die Unebenheiten des Untergrundes des Versuchsbehälters wurden ausgeglichen, indem eine dünne Ausgleichsschicht aus trockenem Feinsand unter der Erddruckdose EV am Boden der Versuchskiste aufgebracht wurde.

Bei der Probenherstellung wurde das GSG befeuchtet, um die Staubentwicklung zu reduzieren und das Probematerial lose in den Behälter geschüttet und verdichtet. Dies erfolgte mit einem elektrisch betriebenen Rüttler. Eine Übersicht der Proben mit den dazugehörigen Dichten im feuchten und trockenen Zustand kann der Tab. 3.18 entnommen werden.

Tabelle 3.18: Übersicht der Proben, [Steurer, unveröffentlicht]

Probenbezeichnung	Materialtyp	H <sup>1</sup> [cm]	V <sup>2</sup> [%]	Anzahl der Lage(n) [-]	Dichte $\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
G150 (2013) SH28 V10	G150 (2013)	28	10	1	0,215	0,200
G150 (2013) SH28 V25	G150 (2013)	28	25	1	0,266	0,247
G150 (2013) SH50 V10	G150 (2013)	50	10	2	0,211	0,184
G150 (2013) SH50 V25	G150 (2013)	50	25	2	0,270	0,229
G210 (2013) SH28 V10	G210 (2013)	28	10	1	0,330	0,303
G210 (2013) SH28 V25	G210 (2013)	28	25	1	0,395	0,306
G210 (2013) SH50 V10	G210 (2013)	50	10	2	0,348	0,296
G210 (2013) SH50 V25	G210 (2013)	50	25	2	0,406	0,322

<sup>1</sup> Probenhöhe

<sup>2</sup> Verdichtungsgrad

Wie aus der Tab. 3.18 ersichtlich, wiesen die Proben aus G210(2013) höhere Trockendichten auf als jene aus G150(2013). Dies wird auf die höhere Korndichte des Materialtyps G210(2013) zurückgeführt.

Bei der Versuchsbeschreibung wurde bereits erwähnt, dass bei der standardisierten Versuchsdurchführung nach drei Vorbelastungsstößen drei weitere Stöße ausgeführt werden, welche zur Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  herangezogen werden. Bei den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurden jedoch über standardisierten Versuch hinausgehend mehr als 6 Stöße ausgeführt, um die Veränderungen der Probe durch die stoßförmige Belastungen festzustellen. Dabei wurde für jeden Einzelstoß  $i$  der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd,i}$  ermittelt. Nach ca. 40 Stößen wurden die Versuche beendet.

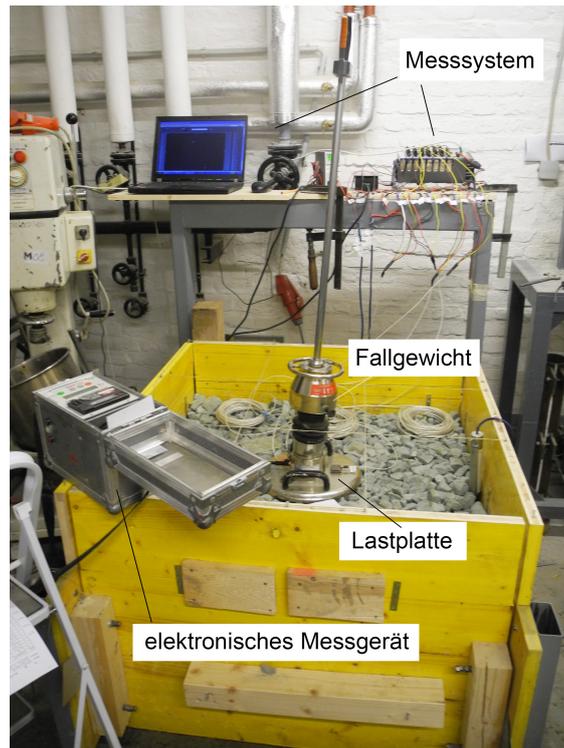


Abbildung 3.28: Versuchsaufbau ohne Auflast [Steurer, unveröffentlicht]

### 3.6.5.1 Auswertung der Versuche

Die Abb. 3.29 zeigt die Verläufe des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,i}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Stöße. Es ist dabei festzustellen, dass es beim dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,i}$  innerhalb der ersten drei Stöße zu einem deutlichen Anstieg kam. Als Grund dafür wird der vor Versuchsbeginn noch nicht vollständig vorhandene Kontakt zwischen der Oberfläche der Probe und der Lastplatte gesehen. Ab dem dritten Stoß kam es zu einem stetigen Anstieg des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,i}$ .

In Tab. 3.19 wurden die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,4\div 6}$  als arithmetischer Mittelwert der Stöße  $4 \div 6$  und die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,Ende}$  als arithmetischer Mittelwert der letzten drei Stöße gegenübergestellt. Die Differenz von  $E_{vd,Ende}$  und  $E_{vd,4\div 6}$  wird als Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,Zuwachs}$  bezeichnet. In Abb. 3.29 wurde der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,Zuwachs}$  exemplarisch für die Probe G210 (2013) V10 grafisch dargestellt.

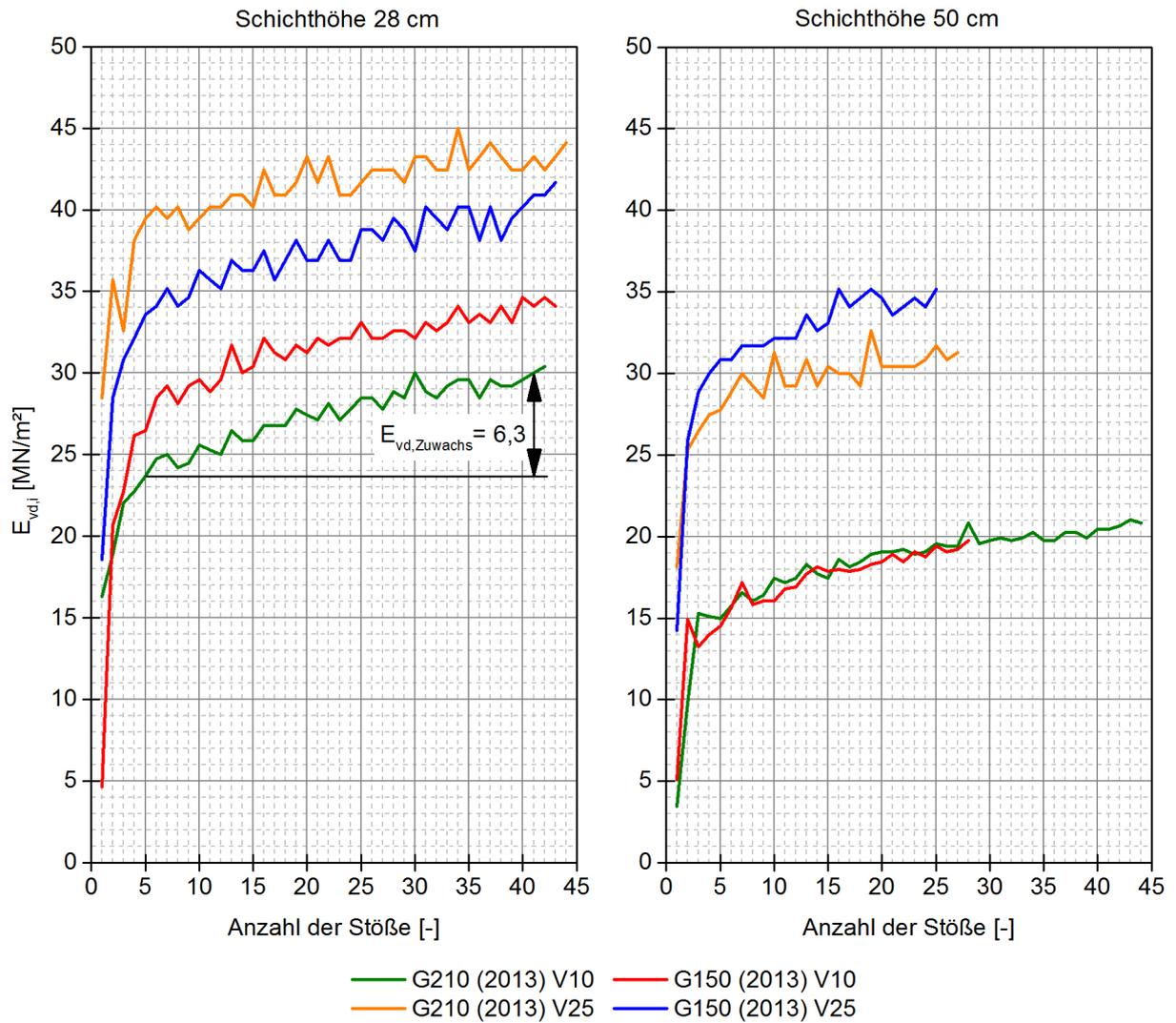


Abbildung 3.29: Dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd_i}$  [Steurer, unveröffentlicht]

Tabelle 3.19: Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,i}$  der Probekörper

Probenbezeichnung	$E_{vd,4\div 6}$ <sup>1</sup> [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd,Ende}$ <sup>2</sup> [MN/m <sup>2</sup> ]	Zuwachs <sup>3</sup> [MN/m <sup>2</sup> ]	Zuwachs <sup>4</sup> [%]
G150 (2013) SH28 V10	27,0	34,3	7,2	26,7
G150 (2013) SH28 V25	33,3	41,2	7,9	23,7
G150 (2013) SH50 V10	14,7	19,4	4,6	31,6
G150 (2013) SH50 V25	30,6	34,6	4,1	13,3
G210 (2013) SH28 V10	23,7	30,0	6,3	26,5
G210 (2013) SH28 V25	39,3	43,3	4,0	10,2
G210 (2013) SH50 V10	15,3	20,8	5,6	36,4
G210 (2013) SH50 V25	28,0	31,3	3,2	11,5

<sup>1</sup> Mittelwert der dynamischen Verformungsmoduln der Stöße 4 ÷ 6

<sup>2</sup> Mittelwert der dynamischen Verformungsmoduln der letzten 3 Stöße

<sup>3</sup> Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls in MN/m<sup>2</sup>, Differenz aus <sup>2</sup> und <sup>1</sup>

<sup>4</sup> Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls in %, Quotient aus <sup>3</sup> und <sup>1</sup>

Anhand des Vergleichs der in Tab. 3.19 angeführten Werte ist zu erkennen, dass der Verdichtungsgrad V einen großen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  hat. Bei Proben mit einem höheren Verdichtungsgrad V sind die dynamischen Verformungsmoduln höher als jene der Proben mit einem geringeren Verdichtungsgrad V. Dies wird damit erklärt, dass durch einen höheren Verdichtungsgrad das Korngefüge verbessert wird, worauf sich höhere dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd}$  ergeben. Dementsprechend ist der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  bei Proben mit einem geringeren Verdichtungsgrad V stärker geprägt.

Ein weiterer Vergleich der in Tab. 3.19 angeführten Werte zeigt, dass auch die Schichthöhe SH einen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  hat. Bei einer Schichthöhe von SH = 28 cm bei einer 1-lagigen Probenherstellung wurden größere  $E_{vd,i}$ -Werte gemessen als bei einer Schichthöhe von SH = 50 cm bei einer 2-lagigen Probeherstellung. Der Grund dafür wird auf den steifen Untergrund des Versuchsbehälters zurückgeführt, der die Messergebnisse beeinflusst.

Der Materialtyp hat auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,i}$  einen sehr geringen Einfluss.

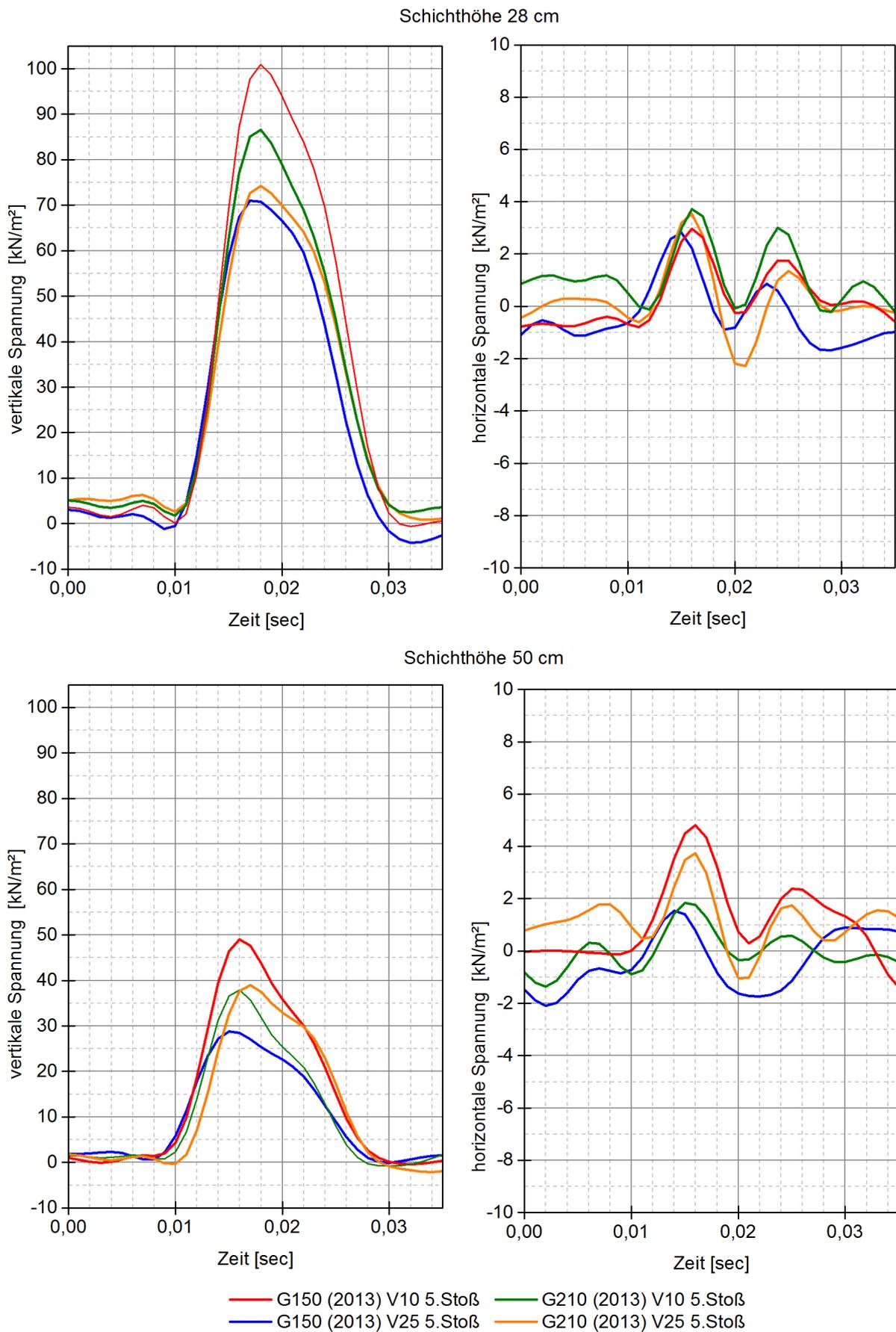


Abbildung 3.30: Gemessene vertikale und horizontale Spannungen mittels der Erddruckdosen EH & EV [Steurer, unveröffentlicht]

In Abb. 3.30 sind die Messdaten der Erddruckdose EH (vertikale Spannungen) und der Erddruckdose EV (horizontale Spannungen) dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wurden dabei die Messdaten in Abhängigkeit von der Schichthöhe SH in unterschiedlichen Diagrammen über die Zeit im Zuge des 5. Stoßes aufgetragen.

Anhand der Abb. 3.30 kann der Einfluss des Verdichtungsgrades  $V$  auf die gemessenen vertikalen Spannungen festgestellt werden. Bei einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  sind die max. vertikalen Spannungen kleiner. Dies wird damit erklärt, dass mit einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  die Lastverteilung innerhalb des Probekörpers verbessert wird. Weiters ist bei einer größeren Probenhöhe  $H$  der Proben eine Reduktion der maximalen vertikalen Spannungen zu beobachten.

Im Gegensatz zu den vertikalen Spannungen ist bei den in Abb. 3.30 dargestellten horizontalen Spannungen ein sehr geringer Anstieg zufolge der stoßförmigen Belastung festzustellen. Damit kann der Einfluss der Seitenwände der Proben auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,i}$  als gering beurteilt.

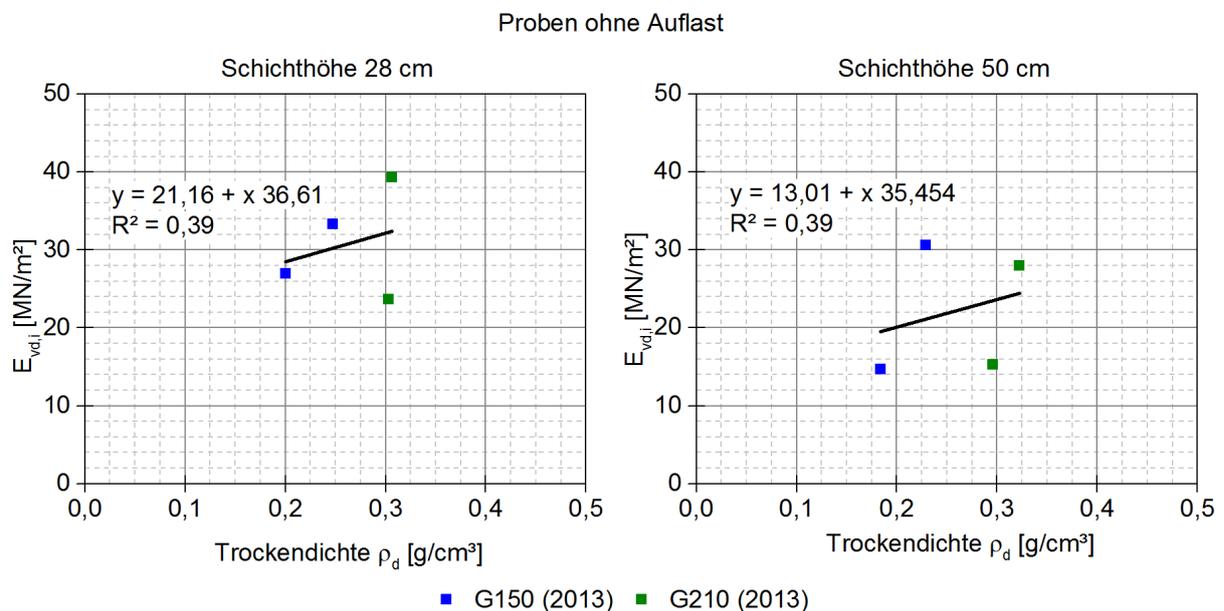


Abbildung 3.31: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_d$  der Proben [Steurer, unveröffentlicht]

In Abbildung 3.31 ist der Zusammenhang zwischen dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,4 \div 6}$  als arithmetischer Mittelwert der Stöße 4  $\div$  6 und der Trockendichte  $\rho_d$  der Proben dargestellt. Dieser weist eine sehr geringe Korrelation auf.

### 3.6.6 Versuchsdurchführung mit Auflastung um die Lastplatte

Im Kapitel 3.4 wurde bereits erwähnt, dass es bei der Verdichtung der Proben zu einer seitlichen Verdrängung der einzelnen GSG-Körner kam, welche auf die geringe Dichte von GSG zurückgeführt wird. An der TU Wien wurde ein Versuchsprocedere entwickelt, bei dem durch einen kreisförmigen Auflastung

die seitliche Materialverdrängung im Zuge von dynamischen Lastplattenversuchen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät praktisch verhindert werden soll.

Der einzige Unterschied zw. der Versuchsdurchführung mit und ohne Auflasting besteht darin, dass es bei der Versuchsdurchführung mit Auflasting aus Stahl mit einem Außendurchmesser von 60 cm und einem Innendurchmesser von 32 cm als Auflast um die Lastplatte angeordnet wird. Mit den zusätzlich symmetrisch auf den Kreisring daraufgestellten runden Stahlkörpern hat die Auflast ein Gesamtgewicht von ca. 90 kg (siehe Abb. 3.32). Somit beträgt die Spannung  $\sigma_{\text{Eigengewicht}}$  zufolge Eigengewicht unter dem Kreisring 4,45 kN/m<sup>2</sup>.



Abbildung 3.32: Versuchsaufbau mit Auflasting um die Lastplatte

Bei den mit Auflast durchgeführten Versuchen sind sowohl die Kurzbeschreibungen der Versuche als auch die ermittelten  $E_{vd}$ -Werte mit der Abkürzung „mA“ im Index gekennzeichnet. Tab. 3.20 gibt eine Übersicht zu den durchgeführten Versuchen mit Auflasting um die Lastplatte.

Tabelle 3.20: Übersicht der Proben

Probenbezeichnung	Materialtyp	H <sup>1</sup> [cm]	V <sup>2</sup> [%]	Anzahl der Lage(n) [-]	Dichte $\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
G150 (2013) SH28 V10 mA	G150 (2013)	28	10	1	0,207	0,180
G150 (2013) SH28 V25 mA	G150 (2013)	28	25	1	0,273	0,241
G150 (2013) SH50 V10 mA	G150 (2013)	50	10	2	0,216	0,189
G150 (2013) SH50 V25 mA	G150 (2013)	50	25	2	0,272	0,272
G210 (2013) SH28 V10 mA	G210 (2013)	28	10	1	0,319	0,270
G210 (2013) SH28 V25 mA	G210 (2013)	28	25	1	0,427	0,335
G210 (2013) SH50 V10 mA	G210 (2013)	50	10	2	0,327	0,275
G210 (2013) SH50 V25 mA	G210 (2013)	50	25	2	0,418	0,343

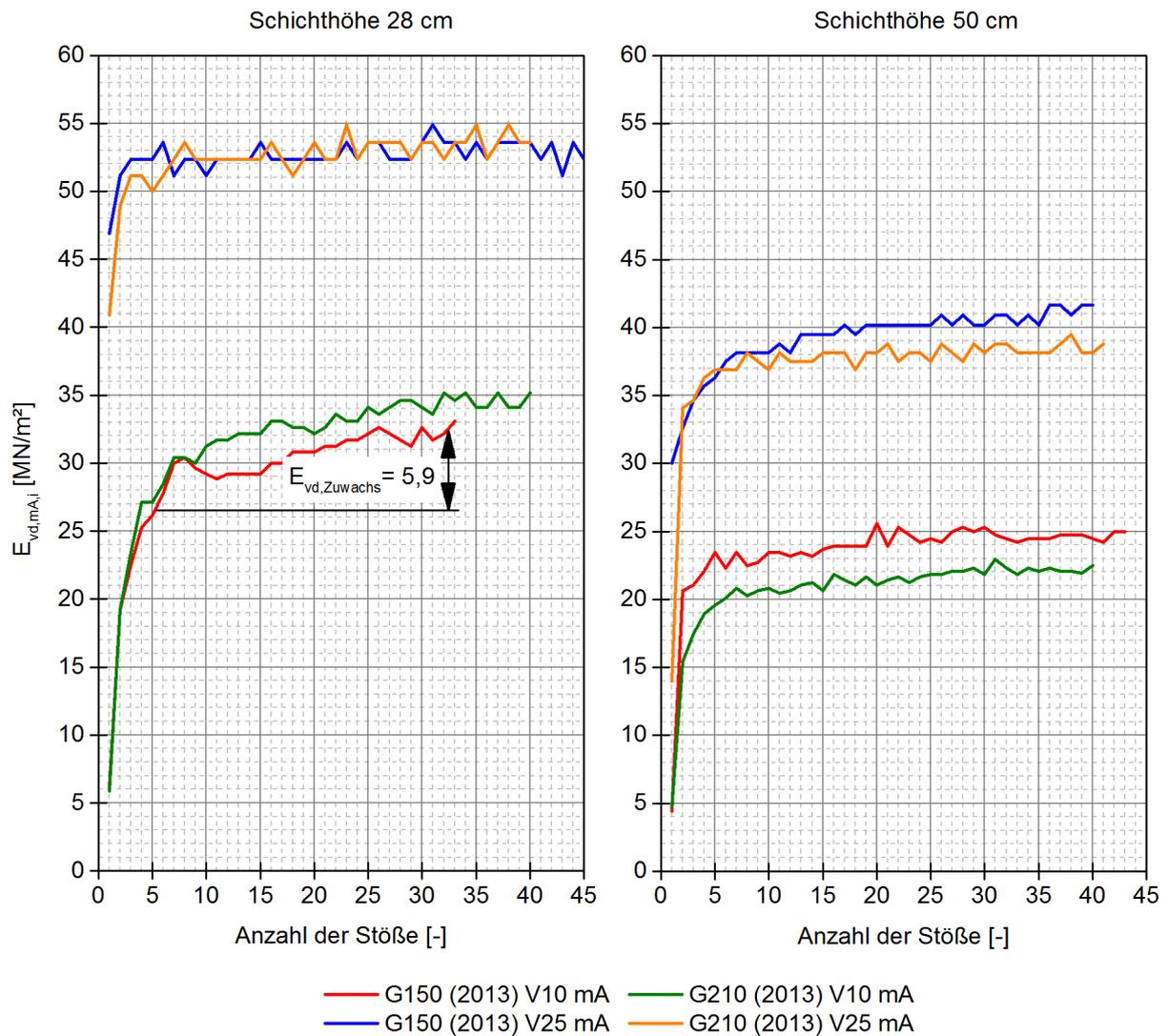
<sup>1</sup> Probenhöhe

<sup>2</sup> Verdichtungsgrad

### 3.6.6.1 Auswertung der Versuche mit Auflastung um die Lastplatte

Die Abb. 3.33 zeigt die Verläufe der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA, i}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Stöße. Es ist dabei festzustellen, dass bei den dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA, i}$  innerhalb der ersten drei Stöße zu einem deutlichen Anstieg kam. Als Grund dafür wird der vor Versuchsbeginn noch nicht vollständig vorhandene Kontakt zwischen der Oberfläche der Probe und der Lastplatte gesehen. Ab dem dritten Stoß kam es zu einem stetigen Anstieg des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA, i}$ .

In Tab. 3.21 wurden die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA, 4 \div 6}$  als arithmetischer Mittelwert der Stöße 4 ÷ 6 und die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, Ende}$  als arithmetischer Mittelwert der letzten drei Stöße gegenübergestellt. Die Differenz von  $E_{vd, mA, Ende}$  und  $E_{vd, mA, 4 \div 6}$  wird als Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA, Zuwachs}$  bezeichnet. In Abb. 3.29 wurde der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA, Zuwachs}$  exemplarisch für die Probe G210 (2013) V10 grafisch dargestellt.

Abbildung 3.33: Dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA, i}$  mit Auflast um die LastplatteTabelle 3.21: Vergleich der dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, i}$  der Probekörper mit Auflast

Probenbezeichnung	$E_{vd, mA, Anfang}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd, mA, Ende}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Zuwachs [MN/m <sup>2</sup> ]	Zuwachs [%]
G150 (2013) SH28 V10 mA	26,4	32,3	5,9	22,3
G150 (2013) SH28 V25 mA	52,7	53,6	0,8	1,6
G150 (2013) SH50 V10 mA	22,6	24,8	2,2	9,9
G150 (2013) SH50 V25 mA	36,7	38,4	1,7	4,6
G210 (2013) SH28 V10 mA	27,6	34,5	6,9	25,0
G210 (2013) SH28 V25 mA	50,8	54,0	3,3	6,4
G210 (2013) SH50 V10 mA	19,5	22,2	2,7	13,8
G210 (2013) SH50 V25 mA	36,5	41,4	4,9	13,5

Anhand eines Vergleichs der in Tab. 3.21 angeführten Werte ist zu erkennen, dass der Verdichtungsgrad  $V$  einen großen Einfluss auf die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,mA}$  hat, sodass bei Proben mit einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  die dynamischen Verformungsmoduln höher sind als bei jenen Proben mit einem geringeren Verdichtungsgrad  $V$ . Dies wird damit erklärt, dass durch einen höheren Verdichtungsgrad das Korngefüge verbessert wird, worauf sich höhere dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd,mA,i}$  ergeben. Dementsprechend ist der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  bei Proben mit einem geringeren Verdichtungsgrad  $V$  stärker geprägt.

Ein weiterer Vergleich der in Tab. 3.19 angeführten Werte zeigt, dass auch die Probenhöhe  $H$  einen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,mA,i}$  hat. Bei einer Probenhöhe von  $H = 28$  cm bei einer 1-lagigen Probenherstellung wurden größere  $E_{vd,mA,i}$ -Werte gemessen als bei einer Probenhöhe von  $H = 50$  cm bei einer 2-lagigen Probeherstellung. Der Grund dafür wird darauf zurückgeführt, dass der steife Untergrund des Versuchsbehälters die Messergebnisse beeinflusst.

Der Materialtyp hat einen geringen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,mA,i}$ .

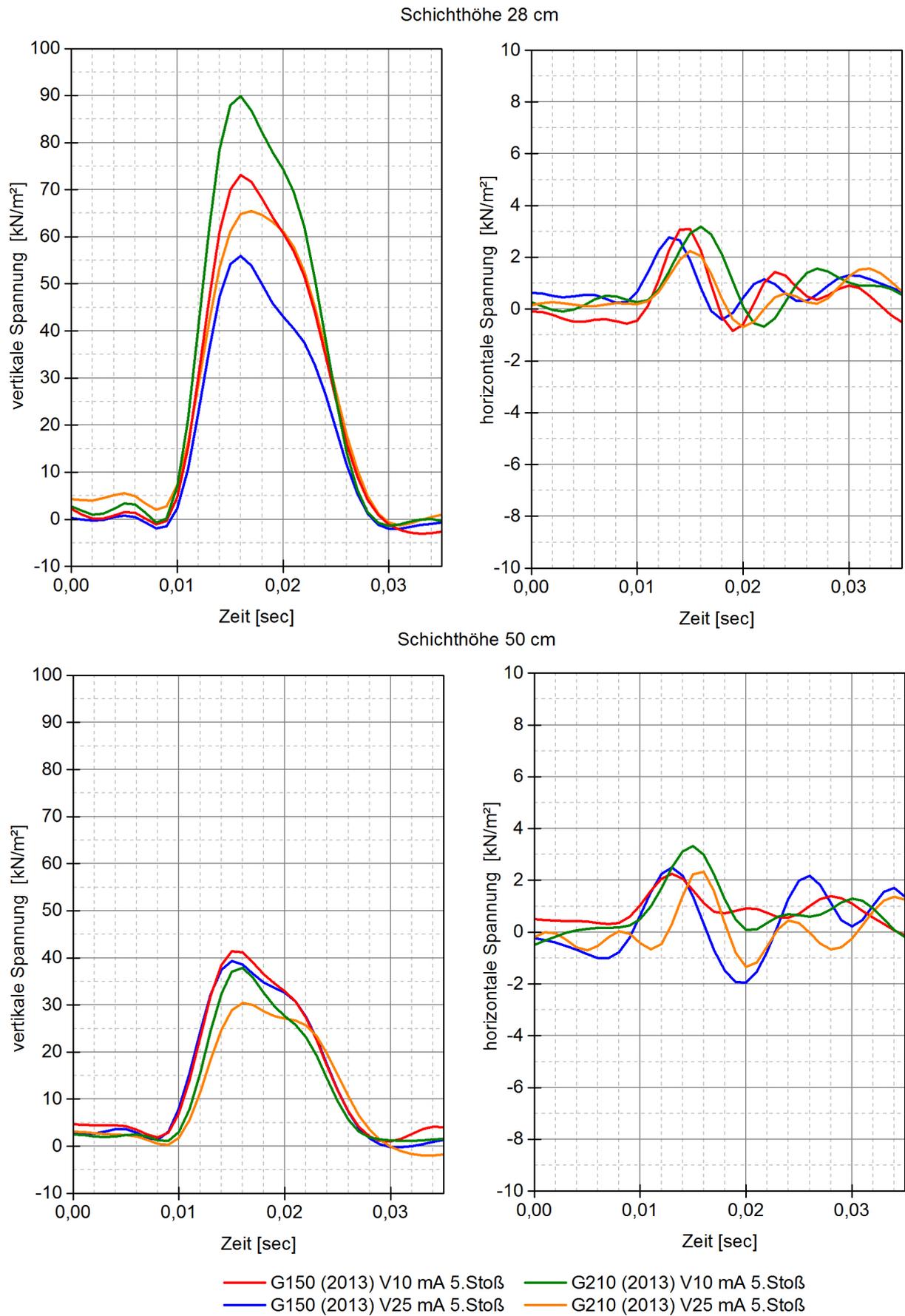


Abbildung 3.34: Messdaten der Erddruckdosen

In Abb. 3.34 wurden die Messdaten der Erddruckdose EH (vertikale Spannungen) und der Erddruckdose EV (horizontale Spannungen) dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wurden dabei die Messdaten in Abhängigkeit von der Schichthöhe SH in unterschiedlichen Diagrammen über die Zeit im Zuge des 5. Stoßes aufgetragen.

Anhand der Abb. 3.34 kann der Einfluss des Verdichtungsgrades  $V$  auf die gemessenen vertikalen Spannungen festgestellt werden. Bei einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  sind die max. vertikalen Spannungen kleiner. Dies wird damit erklärt, dass mit einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  die Lastverteilung innerhalb des Probekörpers verbessert wird. Weiters sind bei einer größeren Schichthöhe SH der Proben eine Reduktion der maximalen vertikalen Spannungen zu beobachten.

Im Gegensatz zu den vertikalen Spannungen ist bei den in Abb. 3.34 dargestellten horizontalen Spannungen ein sehr geringer Anstieg zufolge der stoßförmigen Belastung festzustellen. Damit wird der Einfluss der Seitenwände der Proben auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, mA, i}$  als gering beurteilt.

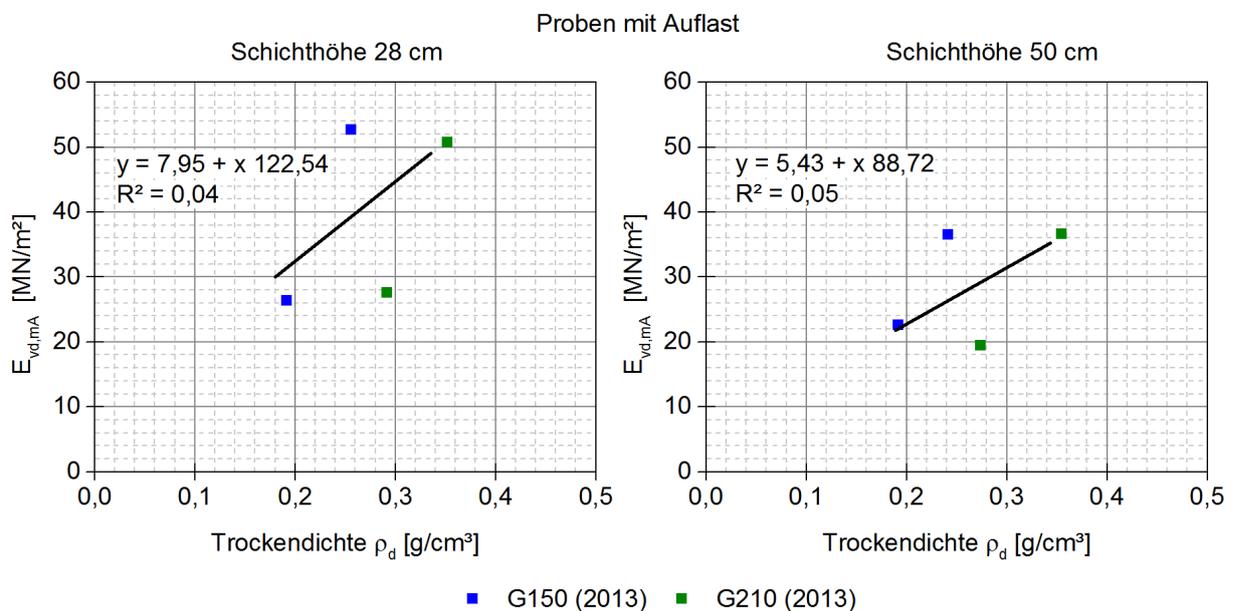


Abbildung 3.35: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd, mA, 4 \div 6}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_d$  der Proben

In Abbildung 3.35 ist der Zusammenhang zwischen dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, 4 \div 6}$  als arithmetischer Mittelwert der Stöße  $4 \div 6$  und der Trockendichte  $\rho_d$  der Proben dargestellt. Dieser weist eine sehr geringe Korrelation auf.

### 3.6.7 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse mit und ohne Auflast

Es wurde bereits anhand der Abb. 3.29 und 3.33 gezeigt, dass der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, i}$  bzw.  $E_{vd, mA, i}$  unabhängig von der Art der Versuchsdurchführung (mit und ohne Auflast um die Lastplatte) mit steigender Anzahl der Stöße  $i$  zuwächst.

Anhand der Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte der dynamischen Verformungsmoduln der Stöße  $4 \div 6$   $E_{vd,4 \div 6}$  und der dynamischen Verformungsmoduln der letzten drei Stöße  $E_{vd,Ende}$  in Tab. 3.22 ist zu erkennen, dass bei den Versuchen mit einer Auflast um die Lastplatte höhere dynamische Verformungsmoduln gemessen wurden.

Tabelle 3.22: Gegenüberstellung der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  und  $E_{vd,mA}$

Probenkurzbezeichnung	ohne Auflast <sup>1</sup>	mit Auflast	Anstieg $E_{vd,4 \div 6} - E_{vd,mA,4 \div 6}$ [%]
	$E_{vd,4 \div 6}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd,mA,4 \div 6}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	
G150 (2013) SH28 V10 (mA)	27,0	26,4	-2,3
G150 (2013) SH28 V25 (mA)	33,3	52,7	58,5
G150 (2013) SH50 V10 (mA)	14,7	22,6	53,6
G150 (2013) SH50 V25 (mA)	30,6	36,7	20,1
G210 (2013) SH28 V10 (mA)	23,7	27,6	16,3
G210 (2013) SH28 V25 (mA)	39,3	50,8	29,3
G210 (2013) SH50 V10 (mA)	15,3	19,5	27,7
G210 (2013) SH50 V25 (mA)	28,0	36,5	30,3

<sup>1</sup> [Steurer, unveröffentlicht]

In Tab. 3.23 sind die Zuwächse der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,Zuwachs}$  für Versuchsdurchführung mit und ohne Auflast gegenübergestellt. Ein Vergleich zeigt, dass es bei den Versuchen mit Auflast zu einem geringeren Zuwachs der dynamischen Verformungsmoduln kommt. Dies lässt sich wie folgt erklären: Durch das Eigengewicht der Auflast entsteht unter der Auflast eine Spannung von  $\sigma_{Eigengewicht} = 4,45 \text{ kN/m}^2$ . Diese Spannung vergrößert die Spannungen im Korngerüst, wodurch die Auflockerungen im Korngerüst reduziert werden. Somit können sich die einzelnen Körner zufolge stoßförmiger Belastung nicht seitlich verdrängen. Außerdem bleibt die Kornverspannung aufgrund der Auflast nach jeder einzelnen stoßförmigen Belastung erhalten und dadurch ergibt sich ein niedrigerer Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,mA}$ .

Tabelle 3.23: Gegenüberstellung der Zuwächse der dyn. Verformungsmoduln  $E_{vd}$  und  $E_{vd, mA}$  mit und ohne Auflast um die Lastplatte

Probenkurzbezeichnung	Zuwachs ohne Auflastring <sup>1</sup>	Zuwachs mit Auflastring (mA) <sup>2</sup>
	[%]	[%]
G150 (2013) SH28 V10 (mA)	27	22
G150 (2013) SH28 V25 (mA)	24	2
G150 (2013) SH50 V10 (mA)	32	10
G150 (2013) SH50 V25 (mA)	13	5
G210 (2013) SH28 V10 (mA)	27	25
G210 (2013) SH28 V25 (mA)	10	6
G210 (2013) SH50 V10 (mA)	37	14
G210 (2013) SH50 V25 (mA)	12	13
<b>Mittelwert</b>	<b>23</b>	<b>12</b>

<sup>1</sup> Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, i}$  [Steurer, unveröffentlicht]

<sup>2</sup> Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls mit Auflast  $E_{vd, mA, i}$

In Tab. 3.24 wurden die mittels Erddruckdose EV gemessenen maximalen Spannungen zuf. stoßförmiger Belastung gegenübergestellt.

Tabelle 3.24: Vergleich der max. Vertikalspannungen der Versuche mit und ohne Auflast

Probenbezeichnung	max. vertikale Spannung ohne Auflastring	max. vertikale Spannung mit Auflastring
	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]
G150 (2013) SH28 V10 (mA)	101	73
G210 (2013) SH28 V10 (mA)	87	89
G150 (2013) SH28 V25 (mA)	71	56
G210 (2013) SH28 V25 (mA)	74	65
<b>Mittelwert</b>	<b>83</b>	<b>71</b>
G150 (2013) SH50 V10 (mA)	49	41
G210 (2013) SH50 V10 (mA)	38	38
G150 (2013) SH50 V25 (mA)	29	39
G210 (2013) SH50 V25 (mA)	39	30
<b>Mittelwert</b>	<b>39</b>	<b>37</b>

<sup>1</sup> [Steurer, unveröffentlicht]

Wie anhand der in Tab. 3.24 wiedergegebenen max. vertikalen Spannungen ersichtlich, sind bei den Versuchen mit Auflast um die Lastplatte die vertikalen Spannungen geringer. Die Ursache dafür wird darauf zurückgeführt, dass sich durch die Auflast ein dichtes Korngefüge einstellt, wodurch die Lastverteilung in-

nerhalb des Probekörpers verbessert wird. Außerdem ist noch festzustellen, dass dieser Sachverhalt bei einer Probenhöhe  $H$  von 50 cm deutlicher wird.

# 4 Feldversuche

## 4.1 Allgemeines

Im Zuge der Umbauarbeiten am Knoten Prater (A4 Ost Autobahn | A23 Südosttangente Wien) wurden Zu- und Abfahrtsrampen für die neu errichtenden Brücken angelegt. Unter diesen Fahrbahnrampen verlaufen beide Wiener Hauptsammelkanäle und ein Verbindungstunnel der Wiener Linien (siehe Abb. 4.1). Die Gebrauchstauglichkeit von bestehenden Bauwerken darf durch die Errichtung der Rampenbauwerke nicht beeinflusst werden. Dies wird durch die Verwendung des Leichtschüttmaterials GSG für die Errichtung der Rampenbauwerke gewährleistet. Aufgrund eines nicht vorhandenen Regelwerks für den Einbau sowie der Verdichtungskontrolle von GSG-Schichten wurde anhand eines Probefeldes (A23, Rampe 1) die optimale Einbaumethode bestimmt und verschiedene Methoden zur Beurteilung des Verdichtungsgrades miteinander verglichen.

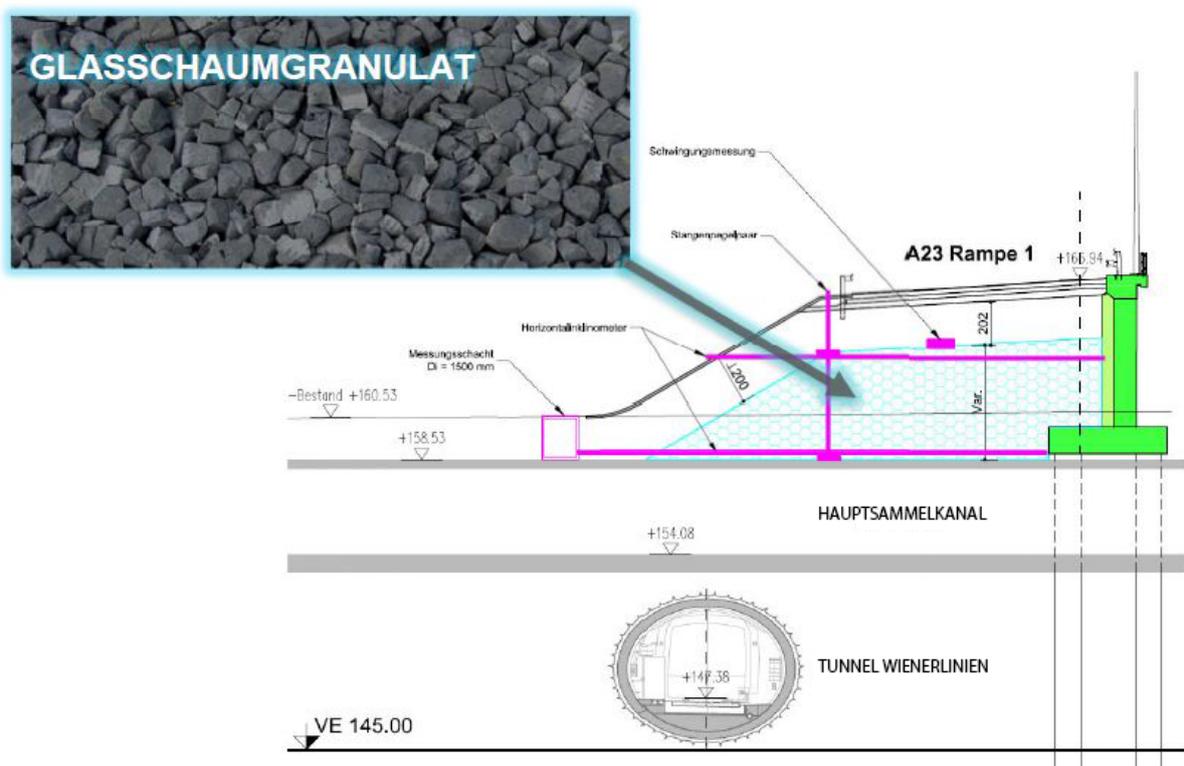


Abbildung 4.1: Querschnitt GSG [6]

## 4.2 Planung des Probefeldes

Das Probefeld wurde 3-lagig hergestellt und in jeder Lage auf nebeneinander markierten Spuren die Verdichtungswirkung drei verschiedener Verdichtungsgeräte miteinander verglichen. Um dies zu ermöglichen, hatte das Probefeld die Mindestabmessungen von 25 x 7 m. Geplant wurde eine Schütthöhe von ca. 40 cm je Lage (im unverdichteten Zustand).

Bei den Verdichtungsgeräten handelte es sich dabei um Tandemwalzen mit 3,6 t und 7,6 t Masse (siehe Abbildung 4.2) und den Anbauverdichter mit Kompaktlader (Bobcat)-Führung (siehe Abb. 4.3).



Abbildung 4.2: links: Tandemwalze Glattmantelbandagen Bomag BW 135 AD (3,6 t), rechts: Tandemwalze Glattmantelbandagen Bomag BW 151 AD-2 (7,6 t)

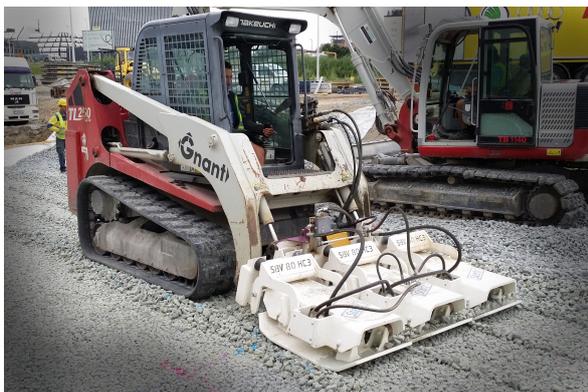


Abbildung 4.3: links: Kompaktlader mit Anbauverdichter Stehr SBV80 HC3, rechts: Kompaktlader mit lasergesteuertem Planierschild

## 4.3 Ausführung des Probefeldes und Versuchsdurchführung

Das GSG des Typs Perimeter 50 der Firma TECHNOpor<sup>®</sup> Handels G.m.b.H wurde per LKW angeliefert (siehe Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: Anlieferung GSG lose per LKW (ca. 90 m<sup>3</sup>)

### 4.3.1 Planum

Vor Beginn der Versuche wurde das Baulos, in dem sich das Probefeld befindet, von der beteiligten Baufirma auf die erforderliche Tiefe ausgehoben, eine Dränage errichtet und das Planum mit einer Walze verdichtet.

Um die Steifigkeit des Planums im Bereich des Probefeldes zu ermitteln, wurden an den Messpunkten B2 bis G6 die Steifemoduln  $E_{vd}$  mittels der dynamischen Lastplatte in Form des Leichten Fallgewichtsgerätes ermittelt und in Tab. 4.1 gegenübergestellt. Anhand der  $E_{vd}$ -Werte kann man von einer homogenen Untergrundbeschaffenheit des Planums innerhalb jeder Spur ausgehen.

Tabelle 4.1:  $E_{vd}$ -Werte des Planums in MN/m<sup>2</sup> [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien]

	Spur 1	Spur 2	Spur 3
Achsen	6	4	2
B	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
C	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
D	29,0	42,0	52,2
E	27,7	61,3	36,5
F	31,3	32,3	38,5
G	31,6	30,4	26,7
<b>Mittelwert</b>	<b>29,9 MN/m<sup>2</sup></b>	<b>41,5 MN/m<sup>2</sup></b>	<b>38,5 MN/m<sup>2</sup></b>

<sup>1</sup> kein Versuch durchgeführt (Planum = OK Hauptsammelkanal)

Nach Ermittlung der Steifemoduln  $E_{vd}$  wurden die Messpunkte B2 bis G6 höhenmäßig vermessen. Das Planum wies Niveauunterschiede von ca. 29 cm auf, welche durch die Schüttung der Lage 1 ausgeglichen wurden. Ein Bauvlies mit ca. 2 mm Dicke, welches auf dem gesamten Planum im Bereich des Probefeldes

verlegt wurde, diente als Trennschicht zwischen Planum und GSG. Zuletzt wurden die Spuren markiert (siehe Abbildung 4.5).



Abbildung 4.5: Vlies als Trennschicht zwischen Planum und GSG

### 4.3.2 Lage 1

Die Abmessungen der ersten Lage und die eingesetzten Verdichtungsgeräte je Spur können der Abb. 4.6 entnommen werden.

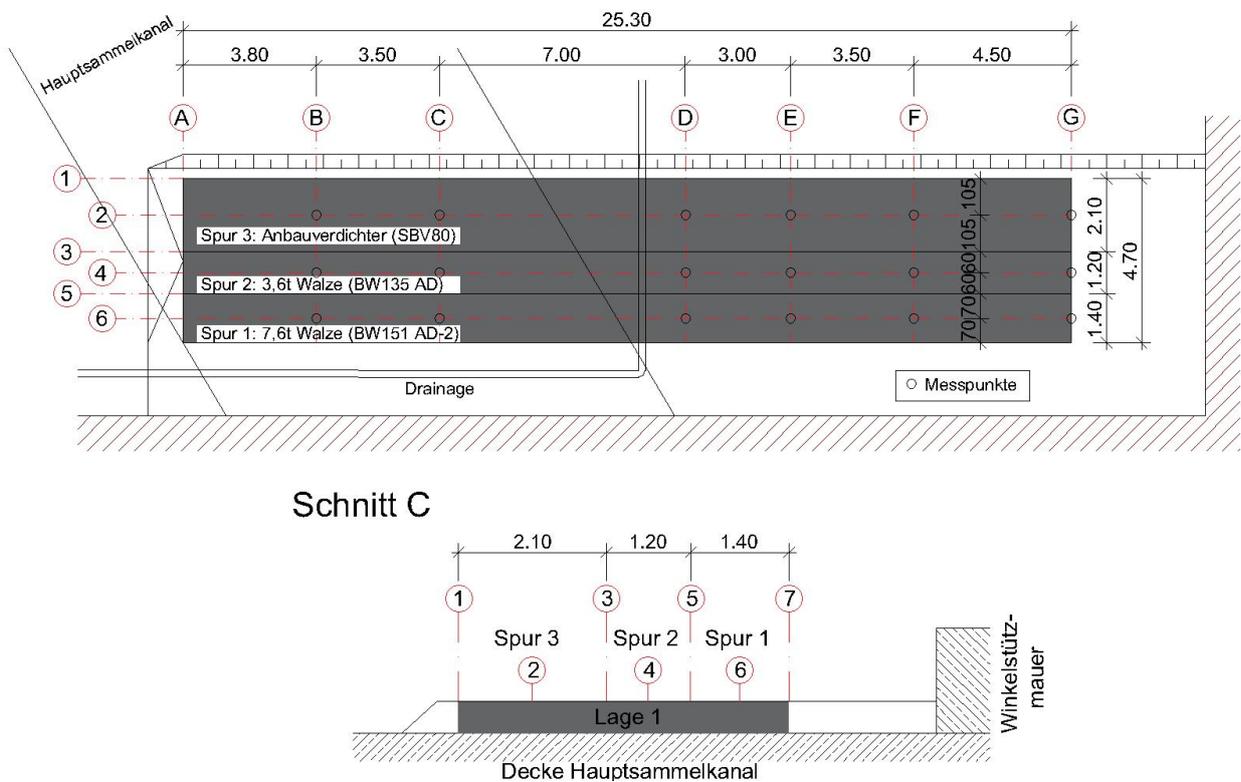


Abbildung 4.6: oben: Grundriss der Lage 1, unten: Schnitt Achse C, [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien]

Vor Beginn der Materialverteilung wurden auf der Achse E sechs Metallzylinder positioniert (siehe Abbildung 4.7), um später die Schüttdichte nach Einbau (vor Verdichtung)  $\rho_G$  und die Dichte nach Einbau und Verdichtung  $\rho_{G,V}$  je Spur bestimmen zu können. Anschließend wurde das Material mittels des Schildes des Raupenbaggers sowie mit dem Schild des Kompaktladers verteilt. Durch das Hin- und Herfahren des Raupenbaggers während der Materialverteilung wurde das Material vorverdichtet. Dies machte sich durch den an der Oberfläche der ersten GSG-Schicht entstehenden Kornabrieb bemerkbar.



Abbildung 4.7: Volumenbestimmung mittels Zylindermethode

Drei der sechs Metallzylinder wurden unmittelbar nach Verteilen (vor dem Verdichten) des GSG geborgen und die Schüttdichte  $\rho_G$  bestimmt.

Vor Beginn der Verdichtungsarbeiten wurde an den Messpunkten B2-G6 (siehe Abb. 4.6) dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerätes mit Auflastring durchgeführt. Aufgrund der im Labor erworbenen Kenntnisse wurde im Versuchsfeld eine Versuchsanordnung mit Auflastring angewendet, um die seitliche Verdrängung des GSG aufgrund dessen geringer Dichte zu reduzieren. Dabei wurde wie in Abb. 4.8 abgebildet, der im Labor verwendete Auflastring mit einem Gewicht von ca. 90 kg verwendet. Anschließend wurden die Messpunkte B2-G6 höhenmäßig vermessen und mit den Verdichtungsarbeiten begonnen.



Abbildung 4.8: Versuchsdurchführung mit Auflastring um die Lastplatte

Die Art der Verdichtung (statisch oder dynamisch) und die Anzahl der Überfahrten mit dem jeweiligen

Verdichtungsgerät wurden aufgrund der gemessenen  $E_{vd}$ -Werte vor Ort angepasst und können Tab. 4.2 entnommen werden.

Tabelle 4.2: Verdichtung der Lage 1

Spur	Verdichtungsgerät	Art der Verdichtung (statisch oder dynamisch)	Überfahrt
1	7,6 t Walze	3x statisch vorwärts & 3x statisch rückwärts	1-6
		2x dynamisch vorwärts & 2x statisch rückwärts	7-10
2	3,6 t Walze	3x stat. vorwärts & 3x stat. rückwärts	1-6
	7,6 t Walze	2x dynam. vorwärts & 2x stat. rückwärts	7-10
3	Kompaktlader	1x dynamisch vorwärts & 1x statisch rückwärts	1-2
	7,6 t Walze	2x dynamisch vorwärts & 2 stat. rückwärts	3-6

In den folgenden Abb. 4.9, 4.10, 4.11 wurden die gemessenen dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  für alle drei Spuren der Lage 1 dargestellt.

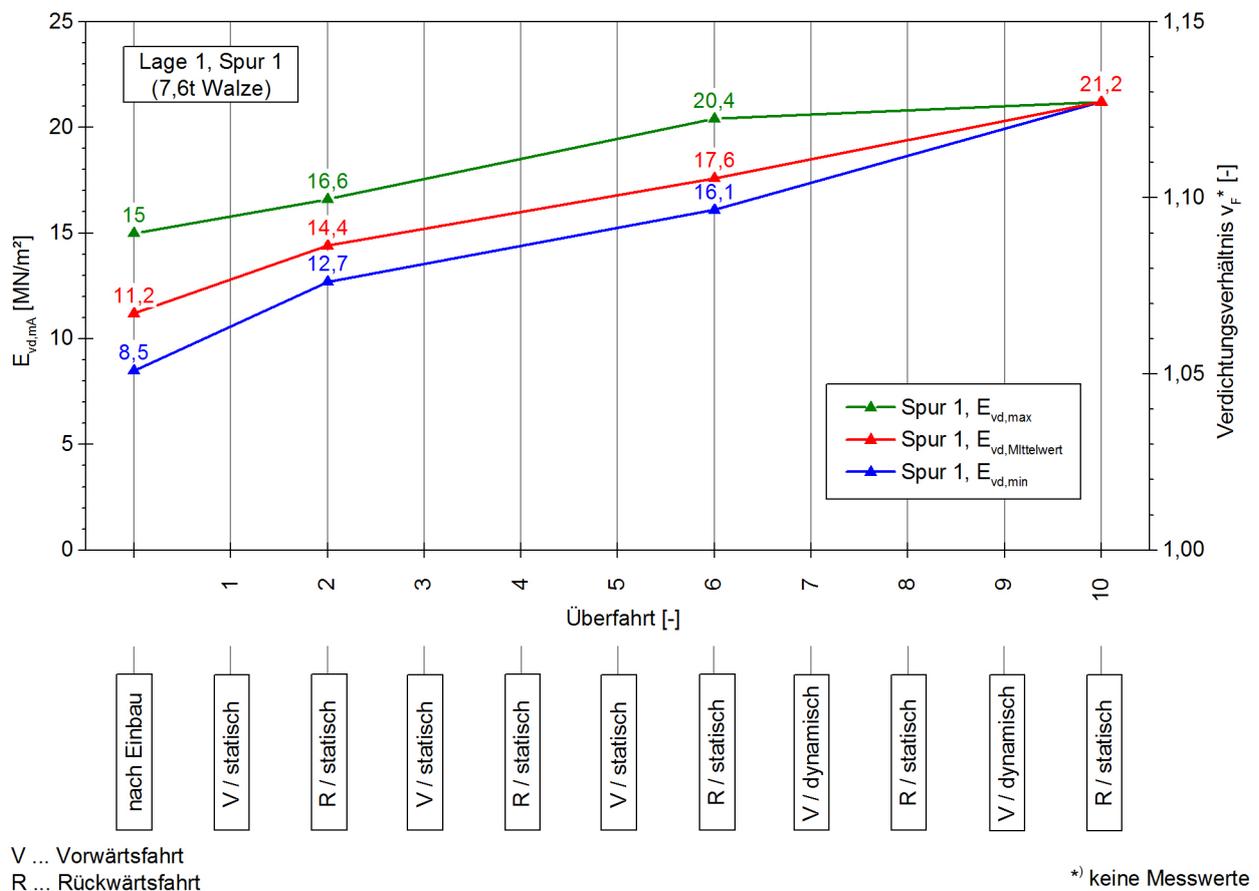


Abbildung 4.9:  $E_{vd, mA}$ -Werte für Lage 1 Spur 1

**Lage 1, Spur 1:** Der nach dem Einbau (vordichtet durch den Einbau) gemessene dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  betrug  $11,2 \text{ MN/m}^2$ . Nach einer Vorwärts- und Rückwärtsfahrt der Walze im statischen Modus wuchs dieser auf  $14,4 \text{ MN/m}^2$ . Nach vier weiteren Überfahrten (zwei vorwärts, zwei rückwärts) im statischen Modus der Walze konnte ein  $E_{vd, mA}$ -Wert von  $17,6 \text{ MN/m}^2$  erreicht werden. Nach zwei weiteren dynamischen Vorwärtsfahrten mit zwei dazugehörigen statischen Rückwärtsfahrten betrug der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA} = 21,2 \text{ MN/m}^2$ . Die Steigerung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA}$  zwischen den Überfahrten 6-10 beträgt  $3,6 \text{ MN/m}^2$  und ist geringfügig größer als zwischen den Überfahrten 1-6 mit  $3,2 \text{ MN/m}^2$ , was auf den dynamischen Modus der Walze zurückgeführt werden kann. Aufgrund der fehlenden Messergebnisse für die Spur 1 konnten keine Verdichtungsverhältnisse  $v_F$  berechnet werden.

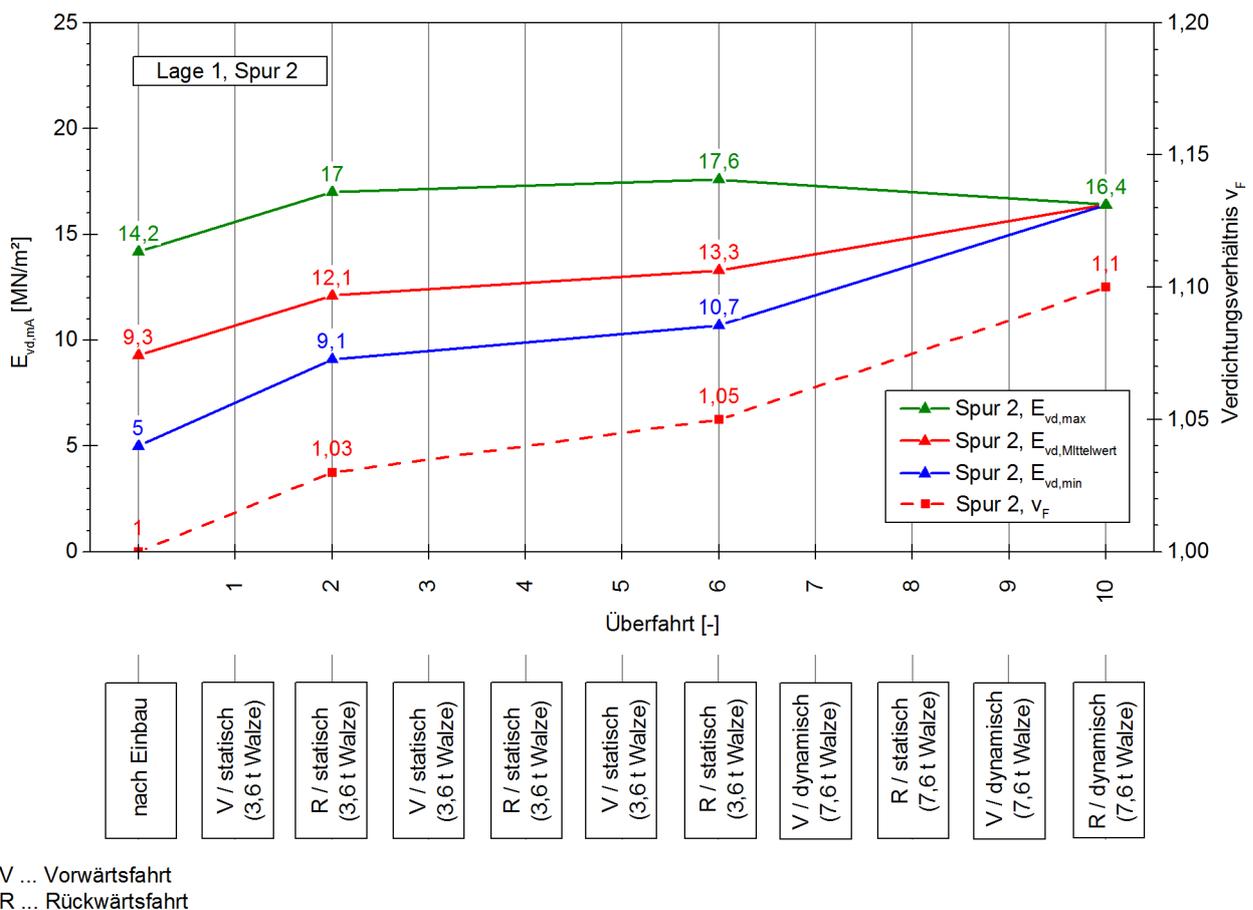
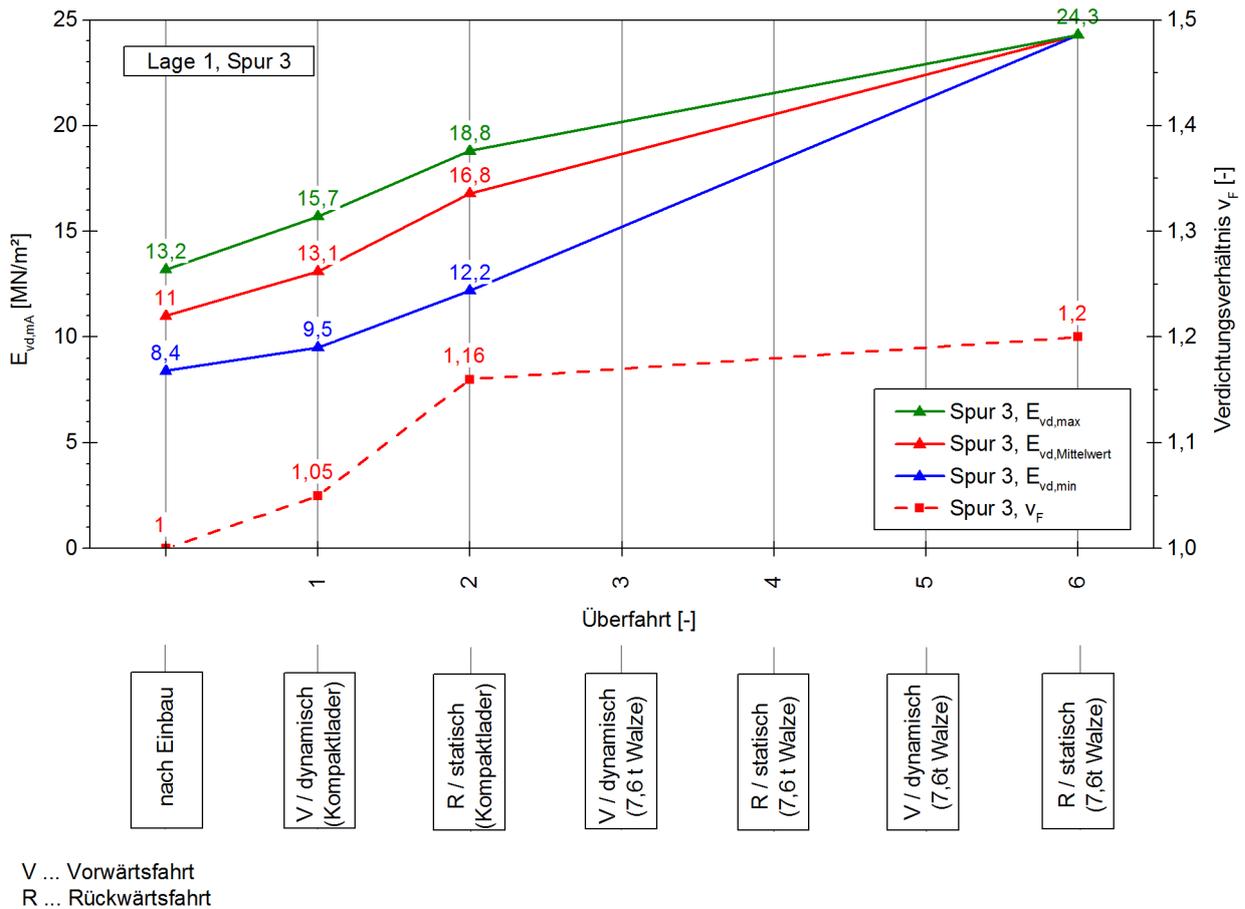


Abbildung 4.10:  $E_{vd, mA}$ -Werte für Lage 1 Spur 2

**Lage 1, Spur 2:** Ausgehend von einem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, mA, Einbau}$  von  $9,3 \text{ MN/m}^2$  konnte nach einer Vorwärts- und Rückwärtsfahrt im statischen Modus der Walze ein  $E_{vd, mA}$   $12,1 \text{ MN/m}^2$  erreicht werden. Nach zwei Vorwärtsfahrten mit zwei dazugehörigen Rückwärtsfahrten im statischen Modus der Walze konnte ein Zuwachs des  $E_{vd}$ -Wertes um  $1,2 \text{ MN/m}^2$  gemessen werden, was nahezu keine Steigerung im Gegensatz zur letzten Messung bedeutete. Auch beim Verdichtungsverhältnis wurde ein geringer Zuwachs von  $v_F = 1 : 1,03$  auf  $v_F = 1 : 1,05$  festgestellt. Nach vier Überfahrten mit der 7,6 t Walze wurde eine Steigerung des dynamischen Verformungsmoduls von  $3,1 \text{ MN/m}^2$  gemessen, welche auf den dynamischen Modus der Walze zurückgeführt wird. Somit wurde nach zehn Überfahrten ein Verdichtungsverhältnis von  $v_F = 1 : 1,10$  erreicht.

Abbildung 4.11:  $E_{vd,MA}$ -Werte für Lage 1 Spur 3

**Lage 1, Spur 3:** Der dynamische Verformungsmodul nach Einbau betrug  $E_{vd, Einbau} = 11,0 \text{ MN/m}^2$ . Es wurde bereits nach einer Vorwärtsfahrt im dynamischen Modus des Kompaktladers der  $E_{vd}$ -Wert um  $2,1 \text{ MN/m}^2$  gesteigert. Die Berechnung des Verdichtungsverhältnisses ergab einen Wert von  $v_F = 1 : 1,05$ . Nach der Rückwärtsfahrt im statischen Modus des Kompaktladers nahm der  $E_{vd}$ -Wert um weitere  $3,7 \text{ MN/m}^2$  zu und das Verdichtungsverhältnis betrug  $v_F = 1 : 1,16$ . Vier Überfahrten mit der 7,6 t Walze bedeuteten ein  $E_{vd,MA}$ -Zuwachs von  $7,5 \text{ MN/m}^2$ . Im Gegensatz dazu wurde das Verdichtungsverhältnis mit  $v_F = 1 : 1,20$  geringfügig größer.

Die Versuchsergebnisse der ersten Lage zeigen, dass auf der mit der 3,6 t Walze verdichteten Spur 2 bei jeder Messung die niedrigsten dynamischen Verformungsmoduln gemessen wurden. Daher wurde bei den darauffolgenden zwei Lagen auf eine Verdichtung mit der 3,6t Walze verzichtet. Daraus folgend wurden die zwei weiteren Lagen zweisepurig hergestellt.

Nach Abschluß der Verdichtungsarbeiten erfolgte eine letzte höhenmäßige Vermessung der Messpunkte B2-G6. Zuletzt wurden die Zylinder geborgen, um bodenphysikalische Versuche durchführen zu können. In Tab. 4.3 wurden die Dichten, Schichthöhen SH und Verdichtungsverhältnisse gegenübergestellt.

Tabelle 4.3: Rohdichten und Verdichtungsverhältnisse  $\rho_{v,F}$  der Lage 1 [21]

Spur	Verdichtungs- gerät	$\rho_G$ <sup>1</sup> n.E. [kg/m <sup>3</sup> ]	SH Lage 1 <sup>2</sup> n.E. [cm]	SH Lage 1 <sup>3</sup> n.E.u.V. [cm]	$v_F$ <sup>4</sup> im Feld [-]	$\rho_{G,V}$ <sup>5</sup> n.E.u.V. [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Walze 7,6 t	256	- <sup>6</sup>	- <sup>6</sup>	- <sup>6</sup>	- <sup>6</sup>
2	Walze 3,6 t	263	30,3	27,4	1,10	290
3	Kompaktlader	296	28,5	24,0	1,20	355

<sup>1</sup> Mittels Zylindermethode ermittelte Dichte nach Einbau (n.E.). Mittelwert aus drei Proben. Die Proben wurden unmittelbar nach dem Einbau (vorverdichtet, jedoch im unverdichteten Zustand) entnommen. Die Effekte aus der Einbaumethode (Vorverdichtung) wurden nicht berücksichtigt.

<sup>2</sup> Arithmetischer Mittelwert der Schichthöhe SH, ermittelt über alle Messpunkte entlang der Achse der jeweiligen Spur nach Einbau (n.E.) - vorverdichtet zuf. Materialeinbringung und -verteilung, jedoch vor Beginn der Verdichtungsarbeiten.

<sup>3</sup> Arithmetischer Mittelwert der Schichthöhe SH nach Einbau und Verdichtung (n.E.u.V.), ermittelt über alle Messpunkte entlang der Achse der jeweiligen Spur.

<sup>4</sup> Verdichtungsverhältnis  $v_F$  im Feld. Ergibt sich aus dem Quotienten [2] und [3].

<sup>5</sup> Die berechnete Dichte nach Einbau und Verdichtung (n.E.u.V). Berechnung aus der Multiplikation [1] und [4].

<sup>6</sup> keine Messergebnisse vorhanden.

### 4.3.3 Lage 2

Wie bereits in Punkt 4.3.3 erwähnt, erreichte die 3,6 t Walze bei der Lage 1 keine zufriedenstellende Verdichtung, wurde somit ausgeschieden und aus diesem Grund die Lage 2 zweispurig ausgeführt. Die Abmessungen der Lage 2 können aus Abb. 4.12 entnommen werden.

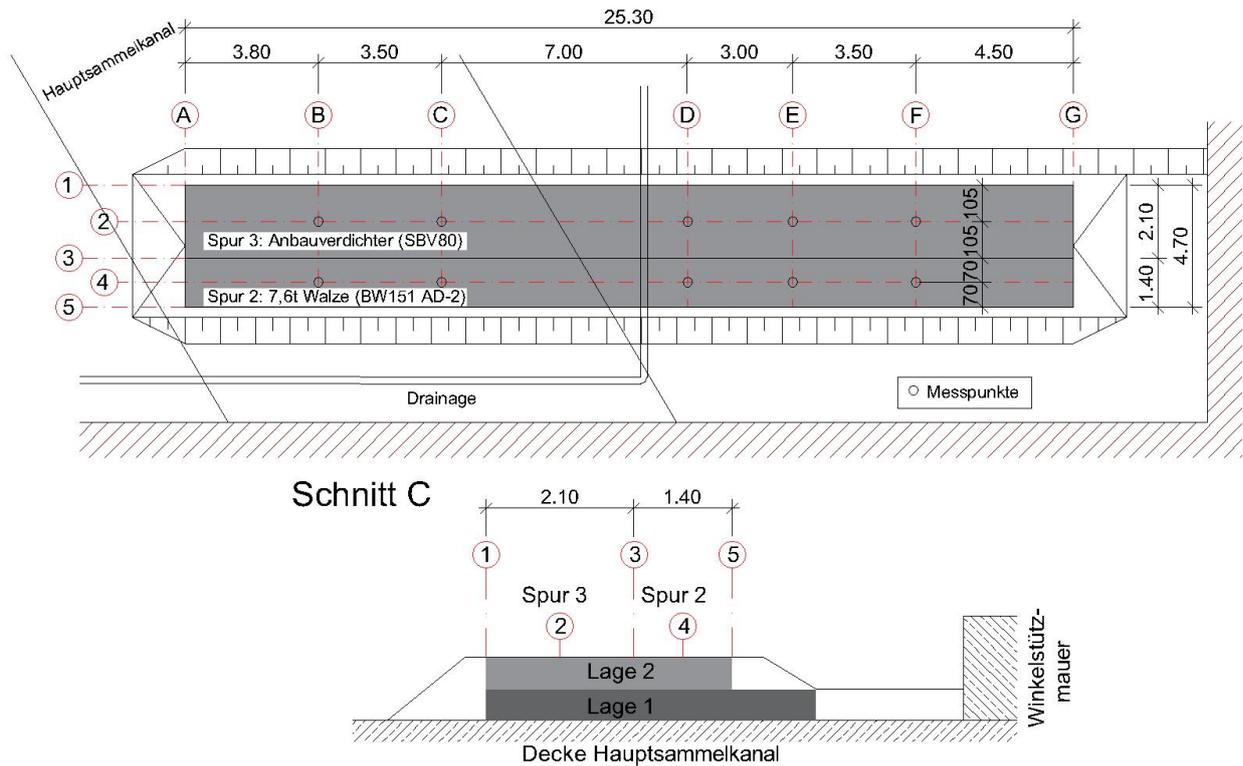


Abbildung 4.12: oben: Grundriss der Lage 2, unten: Schnitt Achse C, [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien]

Um die Effekte aus dem Einbau (Vorverdichtung) auszuschließen, erfolgte bei der Lage 2 die Materialeinbringung mit dem Löffel des Raupenbaggers von außen des Versuchsfeldes (siehe Abb. 4.13). Zur Ermittlung der Schüttdichte  $\rho_G$  wurden drei Metallzylinder durch loses Schütteln mittels Baggerschaufel außerhalb des Versuchsfeldes gefüllt. Vor Beginn der Materialverteilung wurden auf der Achse E drei Metallzylinder positioniert, um nach Abschluß der Verdichtungsarbeiten die Dichte nach Verdichtung  $\rho_{G,V}$  bestimmen zu können.



Abbildung 4.13: Materialeinbringung mit Raupenbagger von außen des Versuchsfeldes

Vor Beginn der Verdichtungsarbeiten wurde am Messpunkt F4 (siehe Abb. 4.12) ein dynamischer Lastplattenversuch (mit Auflast) durchgeführt, anschließend die Messpunkte B2-F4 höhenmäßig vermessen und mit den Verdichtungsarbeiten begonnen. Die Verdichtungsgeräte, die genaue Anzahl der Überfahrten sowie Art der Verdichtung (statisch oder dynamisch) können der Tab. 4.4 entnommen werden.

Tabelle 4.4: Verdichtung der Lage 2

Spur	Verdichtungs- gerät	Art der Verdichtung (statisch oder dynamisch)	Überfahrt
2	7,6 t Walze	1x stat. vorwärts & 1x stat. rückwärts	1-2
		2x dynam. vorwärts & 2x stat. rückwärts	3-6
3	Bobcat	3x dynam. vorwärts & 3x stat. rückwärts	1-6

Nach der letzten Überfahrt wurden in den Punkten B2 bis F4 erneut dynamische Lastplattenversuche mit Auflast und anschließend Höhenmessungen durchgeführt. Zuletzt wurden Zylinderproben geborgen, um bodenphysikalische Untersuchungen durchführen zu können.

In Abb. 4.14 und 4.15 wurden die gemessenen dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  für die Lage 2 dargestellt.

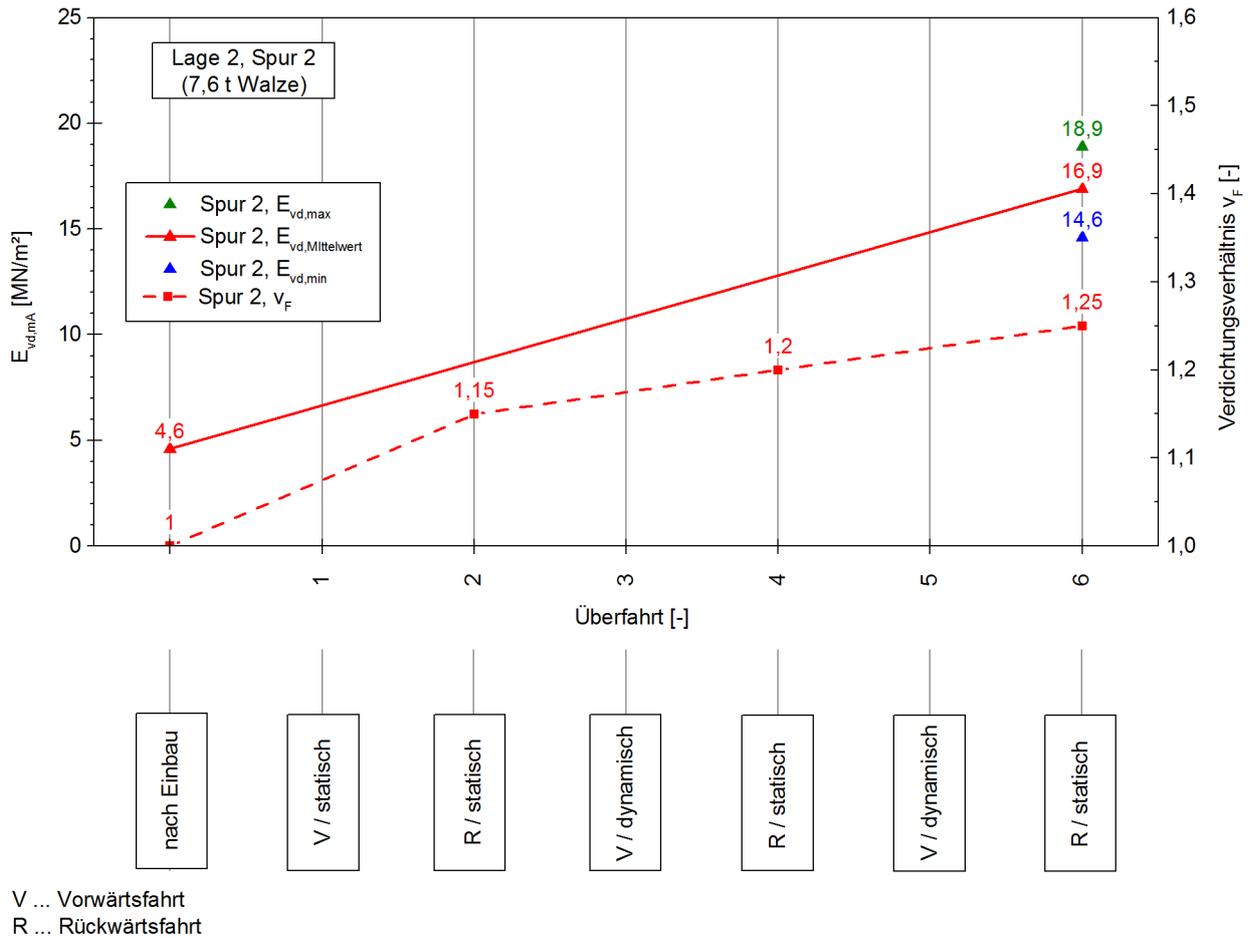
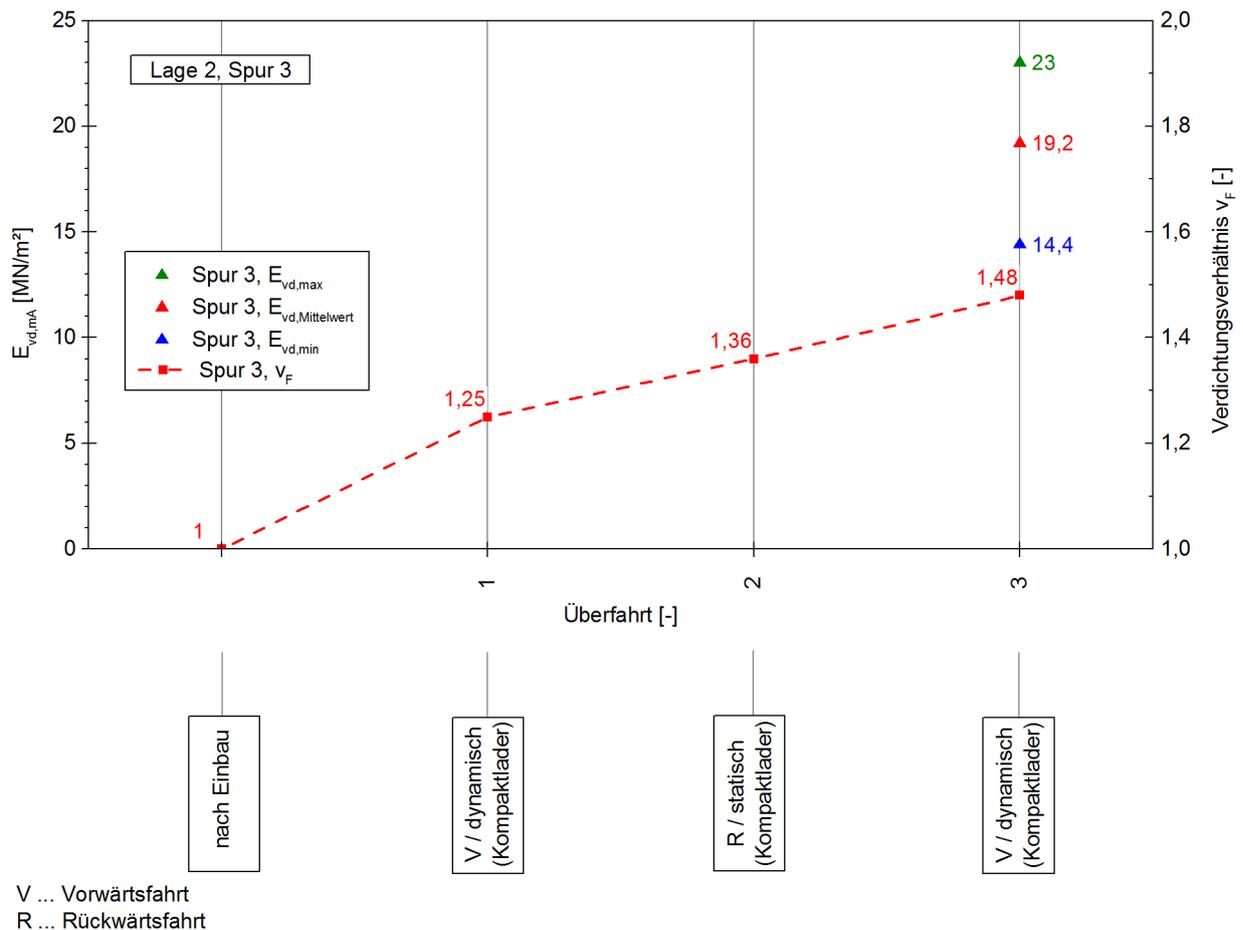


Abbildung 4.14:  $E_{vd}$ -Werte für Lage 2, Spur 2

**Lage 2, Spur 2:** Der nach Einbau (unverdichtet) der Lage 2 gemessene  $E_{vd,MA, Einbau}$ -Wert betrug 4,6 MN/m<sup>2</sup>. Es konnte nach der sechsten Überfahrt ein Zuwachs des  $E_{vd,MA}$ -Wertes von 12,3 MN/m<sup>2</sup> festgestellt werden und das Verdictungsverhältnis wurde mit  $v_F = 1 : 1,25$  berechnet.

Abbildung 4.15:  $E_{vd}$ -Werte für Lage 2, Spur 3

**Lage 2, Spur 3:** Es wurde bei der Spur 3 nach Einbau und vor Beginn der Verdichtungsarbeiten kein Versuch mit der dynamischen Lastplatte durchgeführt und somit kann der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls nicht berechnet werden. Es wurde nach drei Überfahrten ein  $E_{vd}$ -Wert von 19,2 MN/m<sup>2</sup> erreicht.

Um eine Änderung der Lage 2 über Nacht feststellen zu können, wurden am darauf folgenden Morgen (13.08.14) um 07:20 vor Beginn der Schütтарbeiten der Lage 3 eine höhenmäßige Vermessung der Messpunkte und anschließend Versuche mit der dynamischen Lastplatte (mit Auflast) durchgeführt. Anhand von flächenmäßigen Scans der GSG-Oberfläche der Lage 2 am Abend und am darauffolgenden Morgen wurden für beide Spuren zwei Längsschnitte mit einer Überhöhung von 1:5 erstellt (siehe Abb. 4.17 und Abb. 4.16). Vergleicht man beide Längsschnitte, so kann man eine sehr geringfügige Höhenänderung der GSG-Oberfläche feststellen. Dieser beträgt auf der Achse der beiden Spuren im Mittelwert ca. 1 mm, wobei die unbekanntenen Messeinflüsse (siehe Abb. 4.17) bei der Spur 3 nicht berücksichtigt wurden (Berücksichtigung der Höhenangaben zwischen Stationierung 3,836 - 18,0 m). Dieser geringfügige Unterschied liegt im Streubereich der Messergebnisse und kann vernachlässigt werden. Somit kann eine Verformung der GSG-Oberfläche über Nacht ausgeschlossen werden. In Abb. 4.18 wurden die am 12.08.14 um 17:30 Uhr und am darauf folgenden Morgen (13.08.14) um 07:30 Uhr gemessenen  $E_{vd}$ -Werte und die Verdichtungsverhältnisse  $v_F$  miteinander verglichen.

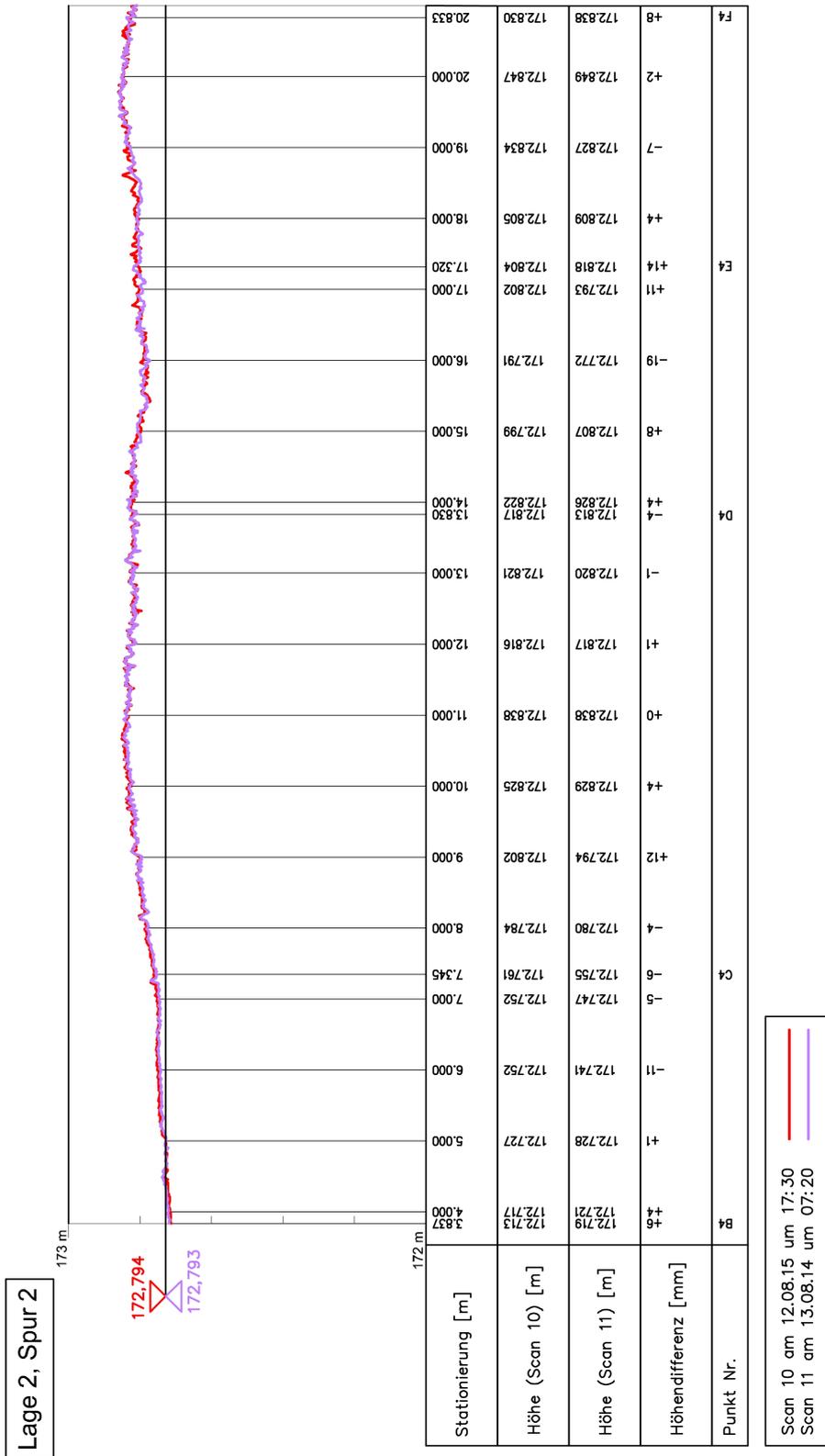


Abbildung 4.16: Vergleich der Längsschnitte für Lage 2 Spur 2

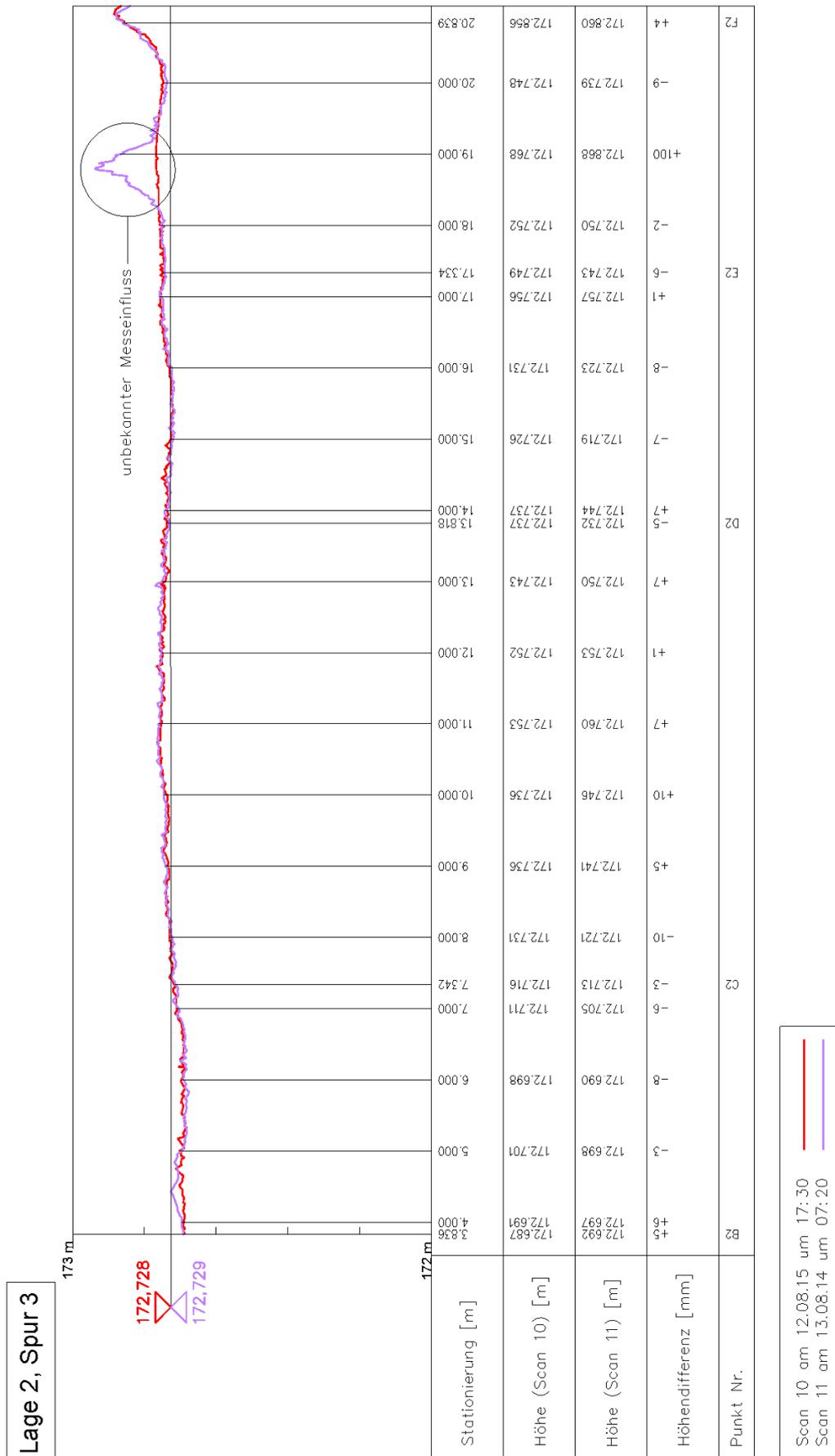
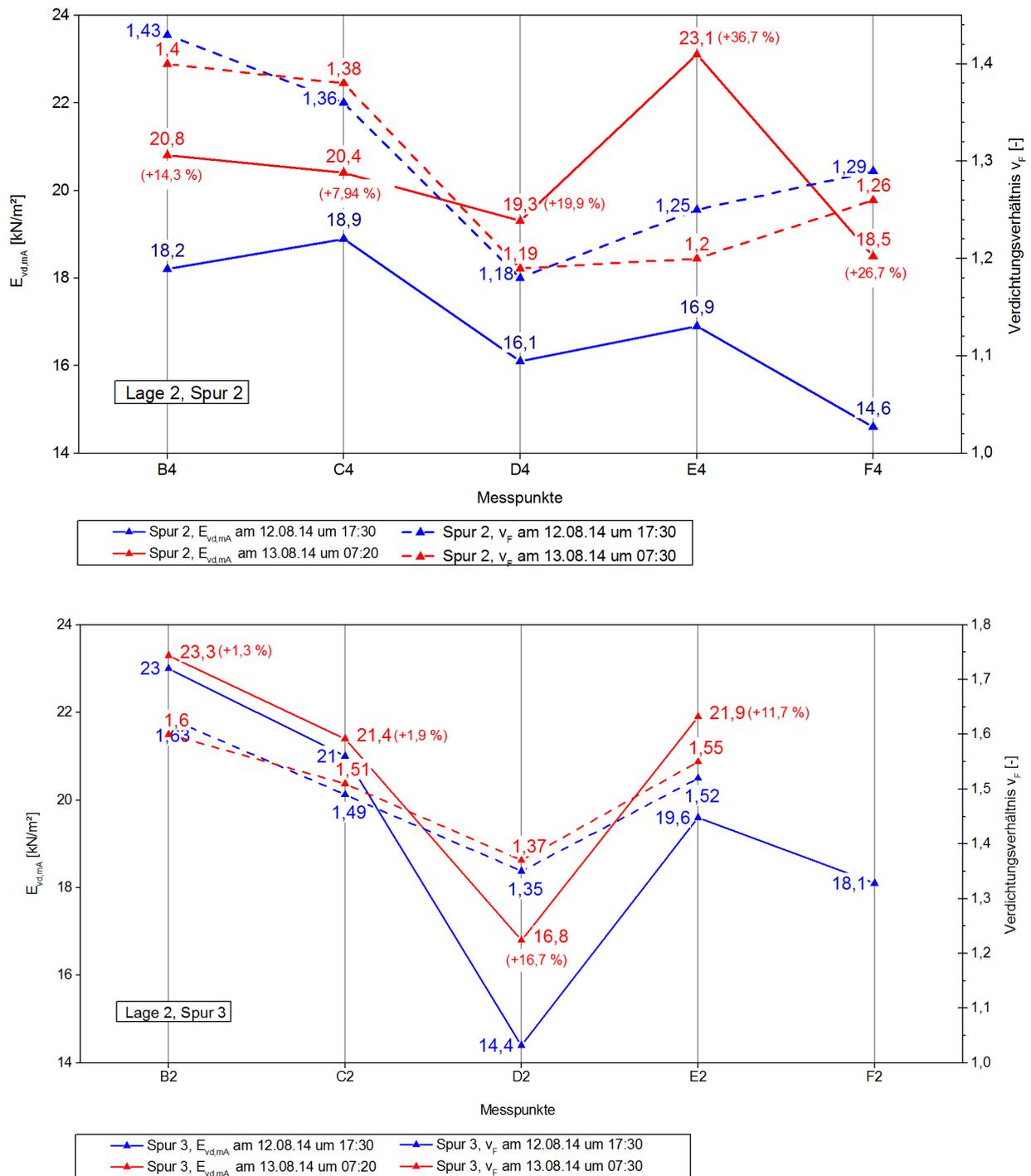


Abbildung 4.17: Vergleich der Längsschnitte für Lage 2 Spur 3

Abbildung 4.18: Änderung der  $E_{vd}$ -Werte über Nacht

Der Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,MA}$  weist punktuell geringfügige Unterschiede auf. Im Mittelwert wuchs der  $E_{vd}$ -Wert innerhalb der Spur 2 um 20,5 % von 16,94 MN/m<sup>2</sup> auf 20,42 MN/m<sup>2</sup>. Die Messergebnisse der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,MA}$  innerhalb der Spur 3 sind nahezu identisch, sodass es zu einem Zuwachs um 6,9 % von 19,5 MN/m<sup>2</sup> auf 20,5 MN/m<sup>2</sup> kam. Aus Sicht des Autors könnte es durch die am vorigen Tag an der selben Messstelle durchgeführten Stöße mit der dynamischen Lastplatte zu einer versuchsbedingten Beeinflussung des Materials gekommen sein, sodass die Steifigkeit anstieg,

worauf sich bei der Messung am darauffolgenden Tag sich etwas höhere dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  ergaben.

In Tab. 4.5 wurden die Dichten, Schichthöhen SH und Verdichtungsverhältnisse für die Lage 2 gegenübergestellt.

Tabelle 4.5: Schichthöhen SH, Rohdichten und Verdichtungsverhältnisse  $\rho_{v,F}$  der Lage 2 [21]

Spur	Verdichtungs- gerät	$\rho_G$ <sup>1</sup> n.E. [kg/m <sup>3</sup> ]	SH Lage 2 <sup>2</sup> n.E. [cm]	SH Lage 2 <sup>3</sup> n.E.u.V. [cm]	$v_F$ <sup>4</sup> im Feld [-]	$\rho_{G,V}$ <sup>5</sup> n.E.u.V. [kg/m <sup>3</sup> ]
2	Walze 7,6 t	213	46,2	37,1	1,25	266
3	Kompaktlader	213	46,6	32,7	1,48	315

<sup>1</sup> Nach Einbau (n.E.) mittels Zylindermethode ermittelte Dichte. Mittelwert aus drei Proben. Die Zylinder wurden außerhalb des Versuchsfeldes mit GSG im Anlieferungszustand gefüllt.

<sup>2</sup> Arithmetischer Mittelwert der Schichthöhe, ermittelt über alle Messpunkte entlang der Achse der jeweiligen Spur nach Einbau (n.E.) im unverdichteten Zustand.

<sup>3</sup> Arithmetischer Mittelwert der Schichthöhe nach Einbau und Verdichtung (n.E.u.V.), ermittelt über alle Messpunkte entlang der Achse der jeweiligen Spur nach Einbau und Verdichtung (n.E.u.V.).

<sup>4</sup> Verdichtungsverhältnis im Feld. Ergibt sich aus dem Quotienten [2] und [3].

<sup>5</sup> Die berechnete Dichte nach Einbau und Verdichtung (n.E.u.V.). Berechnung aus der Multiplikation [1] und [4].

#### 4.3.4 Lage 3

Lage 3 wurde zweispurig ausgeführt. Die Abmessungen können der Abb. 4.19 entnommen werden. Bei der Lage 3 wurde auf beiden Spuren die 7,6 t Walze eingesetzt, da der Bobcat mit Anbauverdichter nicht mehr zur Verfügung stand.

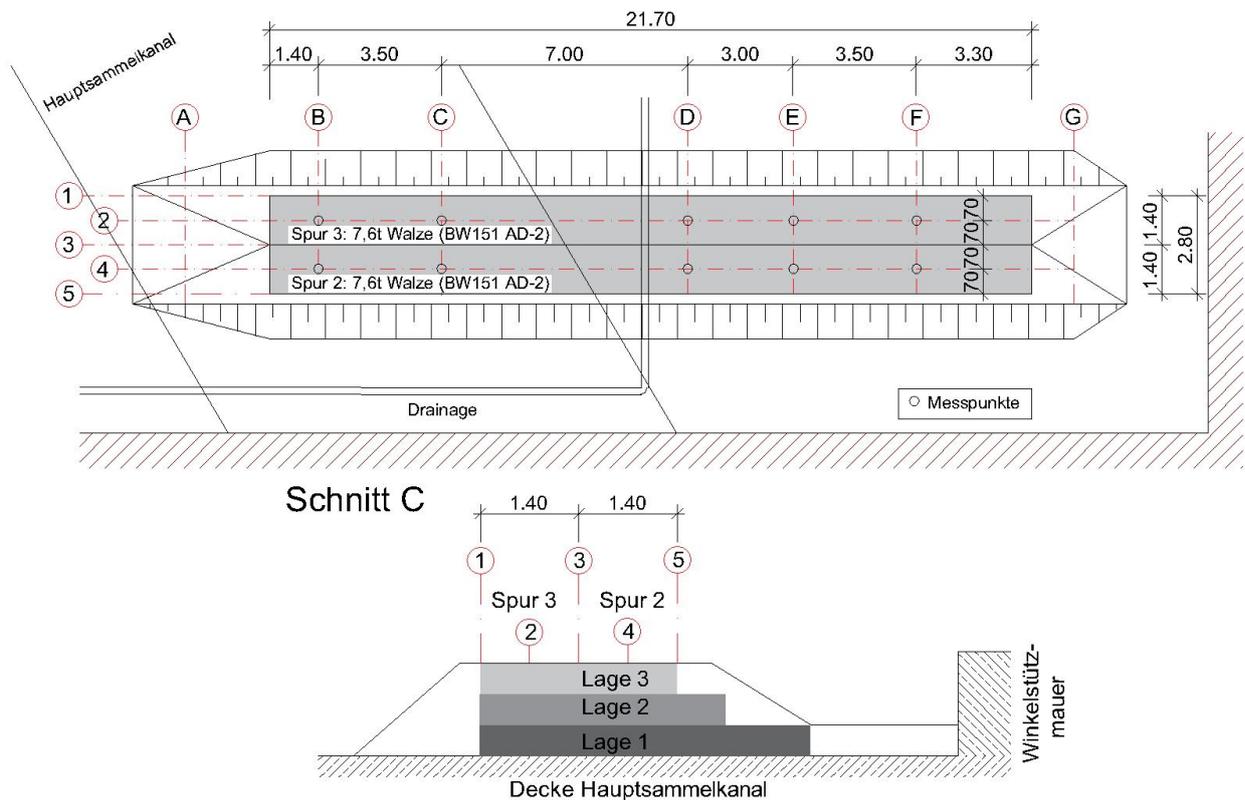


Abbildung 4.19: oben: Grundriss der Lage 3, unten: Schnitt Achse C, [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien]

Zunächst wurde die Schüttdichte  $\rho_G$  durch loses Schütteln der Metallzylinder mittels Baggerschaufel außerhalb der Verdichtungsspuren ermittelt, anschließend das GSG durch Raupenbagger von außen des Versuchsfeldes eingebracht und verteilt. Nach der Spurenmarkierung wurden die Messpunkte B2-F4 höhenmäßig vermessen und im Messpunkt F4 dynamischer Lastplattenversuch (mit Auflast) durchgeführt. Nachfolgend wurde mit den Verdichtungsarbeiten begonnen. Die genaue Anzahl der Überfahrten und die Art der Verdichtung (statisch oder dynamisch) kann der Abb. 4.6 entnommen werden.

Tabelle 4.6: Verdichtung der Lage 3

Spur	Verdichtungs- gerät	Art der Verdichtung (statisch oder dynamisch)	Überfahrt
2	7,6 t Walze	1x stat. vorwärts & 1x stat. rückwärts	1-2
		2x dynam. vorwärts & 2x stat. rückwärts	3-6
3	7,6 t Walze	1x stat. vorwärts & 1x stat. rückwärts	1-2
		2x dynam. vorwärts & 2x stat. rückwärts	3-6

Nach der letzten Überfahrt wurden weitere Versuche mit der dynamischen Lastplatte mit Auflast in den

Messpunkten B2 bis F4 durchgeführt und anschließend erfolgte eine höhenmäßige Vermessung der Messpunkte. Zuletzt wurden die Zylinder geborgen, um die Schüttdichte  $\rho_{G,V}$  ermitteln zu können.

In Abb. 4.20 und 4.21 wurden die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,mA}$  und die berechneten Verdichtungsverhältnisse  $v_F$  für die Lage 3 gegenübergestellt.

**Lage 3, Spur 2:** Der nach Einbau der Lage 3 gemessener  $E_{vd, Einbau}$ -Wert betrug  $4,2 \text{ MN/m}^2$ . Nach drei Vorwärtsfahrten im dynamischen der Walze mit dazugehörigen drei Rückwärtsfahrten im statischen Modus wurde ein  $E_{vd,mA}$ -Wert von  $20,5 \text{ MN/m}^2$  gemessen.

**Lage 3, Spur 3:** Die Art der Verdichtung und die Anzahl der Verdichtungsübergänge entsprechen jener der zweiten Spur. Es wurde nach der sechsten Überfahrt ein  $E_{vd,mA}$ -Wert von  $18,4 \text{ MN/m}^2$  erreicht.

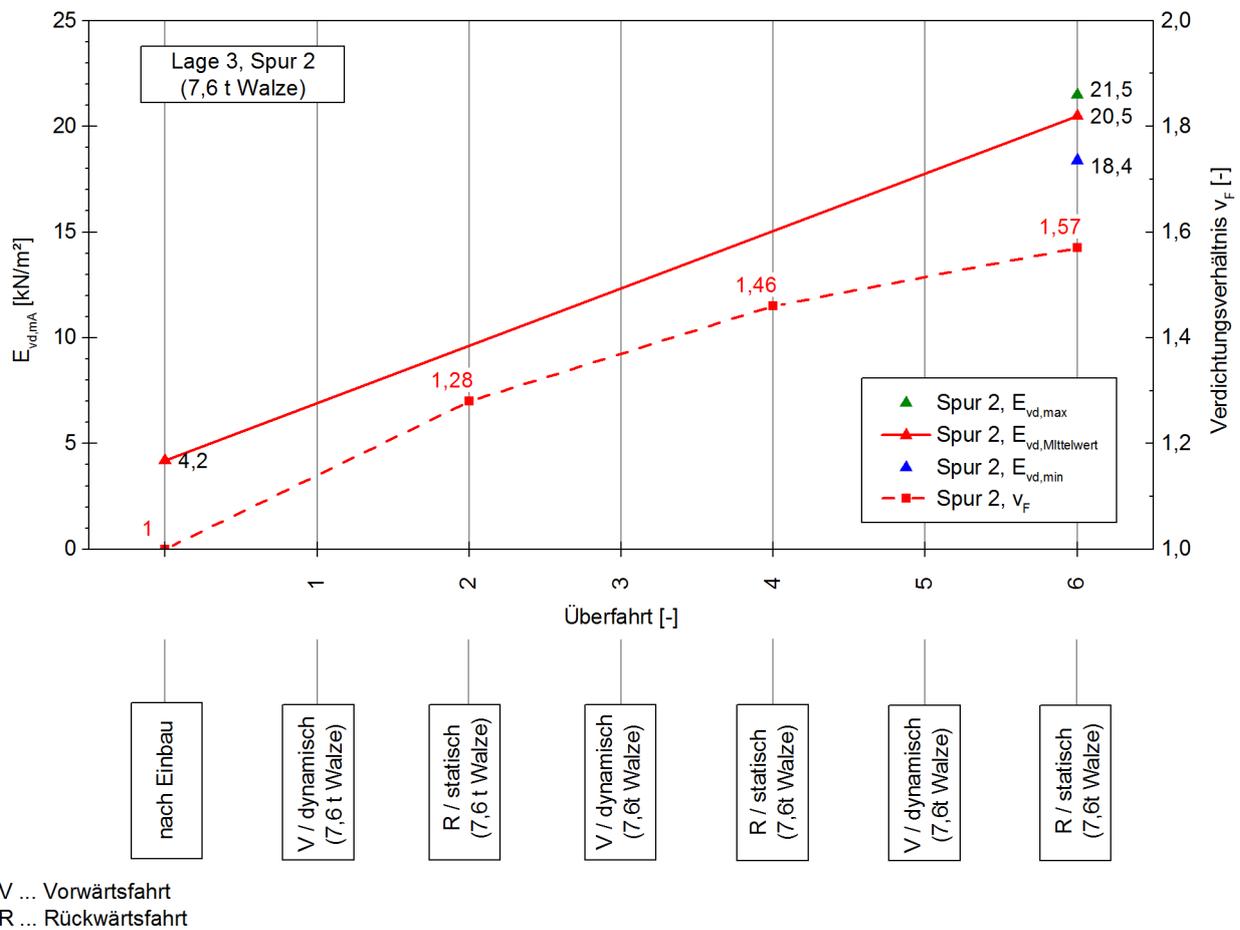


Abbildung 4.20:  $E_{vd}$ -Werte für Lage 3, Spur 2

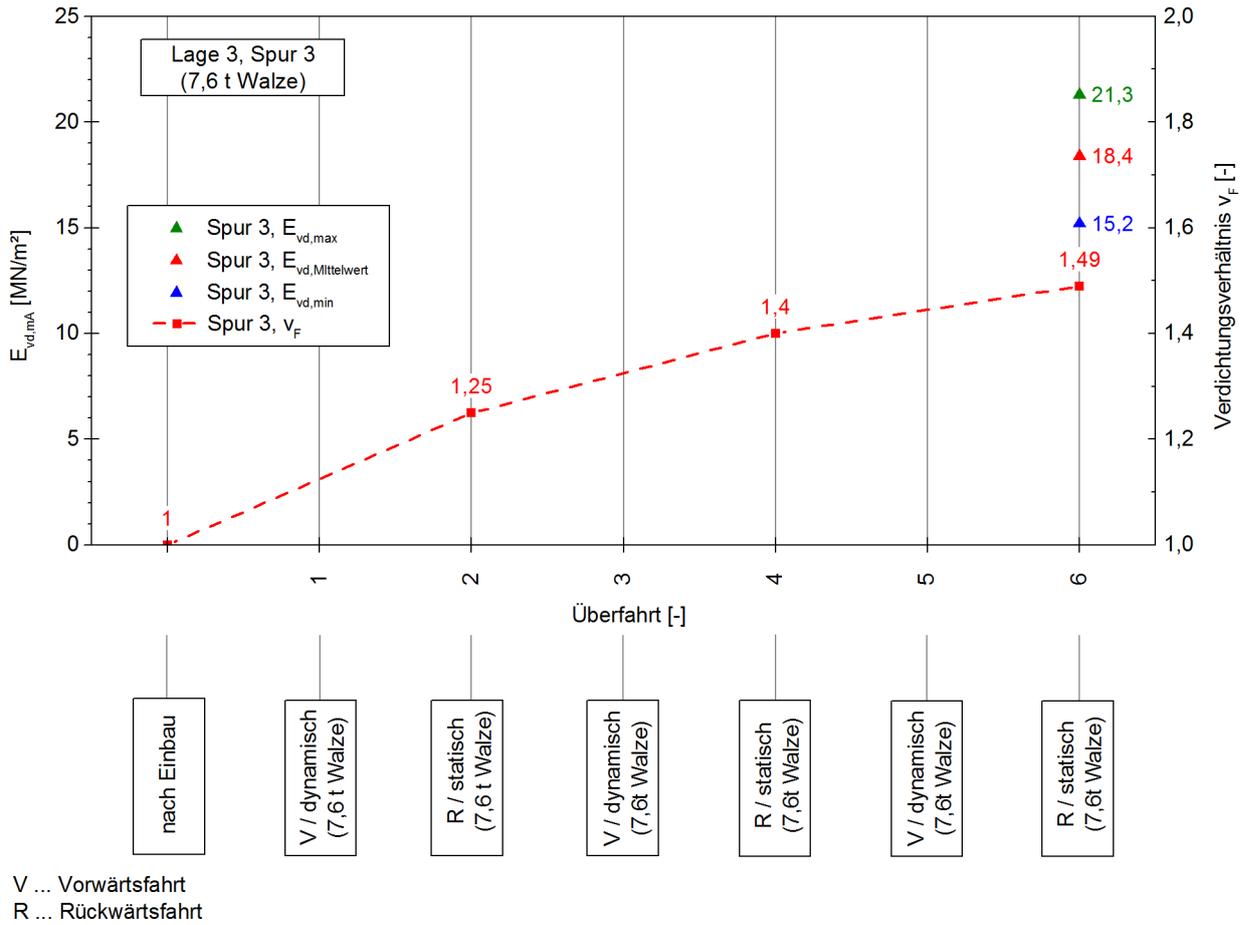


Abbildung 4.21:  $E_{vd}$ -Werte für Lage 3, Spur 3

In Tab. 4.7 wurden die Dichten, Schichthöhen SH und Verdichtungsverhältnisse für die Lage 3 gegenübergestellt.

Tabelle 4.7: Schichthöhen SH, Rohdichten und Verdichtungsverhältnisse  $\rho_{v,F}$  der Lage 3 [21]

Spur	Verdichtungs- gerät	$\rho_G$ <sup>1</sup> n.E. [cm]	SH Lage 3 <sup>2</sup> n.E. [cm]	SH Lage 3 <sup>3</sup> n.E.u.V. [-]	$v_F$ <sup>4</sup> im Feld [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{G,V}$ <sup>5</sup> n.E.u.V.
2	Walze 7,6 t	234	37,7	24,0	1:1,57	368
3	Walze 7,6 t	234	43,9	29,6	1:1,49	349

<sup>1</sup> Unmittelbar nach Einbau (n.E.) mittels Zylindermethode ermittelte Dichte. Mittelwert aus drei Proben. Die Zylinder wurden außerhalb des Versuchsfeldes mit GSG im Anlieferungszustand gefüllt.

<sup>2</sup> Arithmetischer Mittelwert der Schichthöhe, ermittelt über alle Messpunkte entlang der Achse der jeweiligen Spur nach Einbau (n.E.) im unverdichteten Zustand.

<sup>3</sup> Arithmetischer Mittelwert der Schichthöhe nach Einbau und Verdichtung (n.E.u.V.), ermittelt über alle Messpunkte entlang der Achse der jeweiligen Spur nach Einbau und Verdichtung.

<sup>4</sup> Verdichtungsverhältnis im Feld. Ergibt sich aus dem Quotienten [2] und [3].

<sup>5</sup> Die berechnete Dichte nach Einbau und Verdichtung. Berechnung aus der Multiplikation [1] und [4].

## 4.4 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,mA}$ , die Dichten nach Einbau  $\rho_G$  und die Dichten nach Einbau und Verdichtung  $\rho_{G,V}$  und die Verdichtungsverhältnisse  $v_F$  zufolge verschiedener Verdichtungstechnologien auf Basis der arithmetischen Mittelwerte gegenübergestellt und interpretiert.

### 4.4.1 Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$

#### 4.4.1.1 Dynamische Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ nach Einbau

Die unmittelbar nach dem Einbau der jeweiligen GSG-Schichten gemessenen  $E_{vd,mA}$ -Werte für alle drei Lagen wurden in Abbildung 4.22 grafisch gegenübergestellt. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd,mA}$  bei der Lage 1 in den Messpunkten B2-G6, bei der Lage 2 und Lage 3 nur im Messpunkt F4 gemessen wurden.

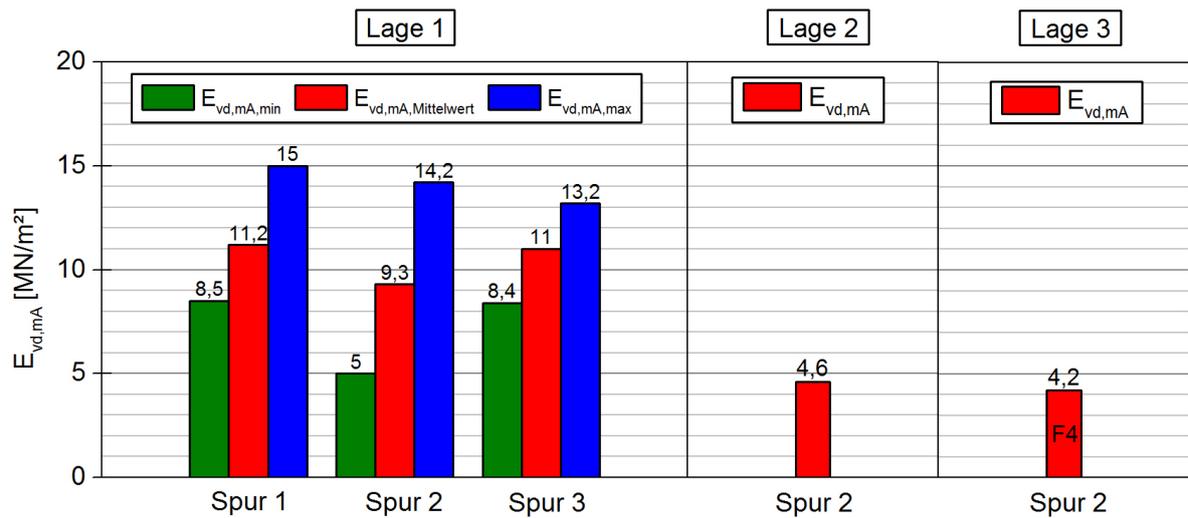


Abbildung 4.22: Vergleich der  $E_{vd}$ -Werte gemessen unmittelbar nach dem Einbau

Der Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  zeigt, dass die  $E_{vd, mA}$ -Werte der Lage 1 mit  $E_{vd, mA} = 9,2 \text{ MN/m}^2$  bis  $E_{vd, mA} = 11,2 \text{ MN/m}^2$  um das 2-2,7-Fache größer sind als jene der Lage 2 und 3 mit  $E_{vd, mA} = 4,2 \text{ MN/m}^2$  bis  $E_{vd, mA} = 4,6 \text{ MN/m}^2$  (siehe Abb. 4.22). Als einer der Gründe dafür kann die im Zuge der Materialeinbringung und -verteilung entstandene Vorverdichtung der Lage 1 genannt werden. Ein weiterer Grund ist das verhältnismäßig steifere Planum unterhalb der Lage 1.

4.4.1.2 Vergleich der dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,mA}$  der Lage 1

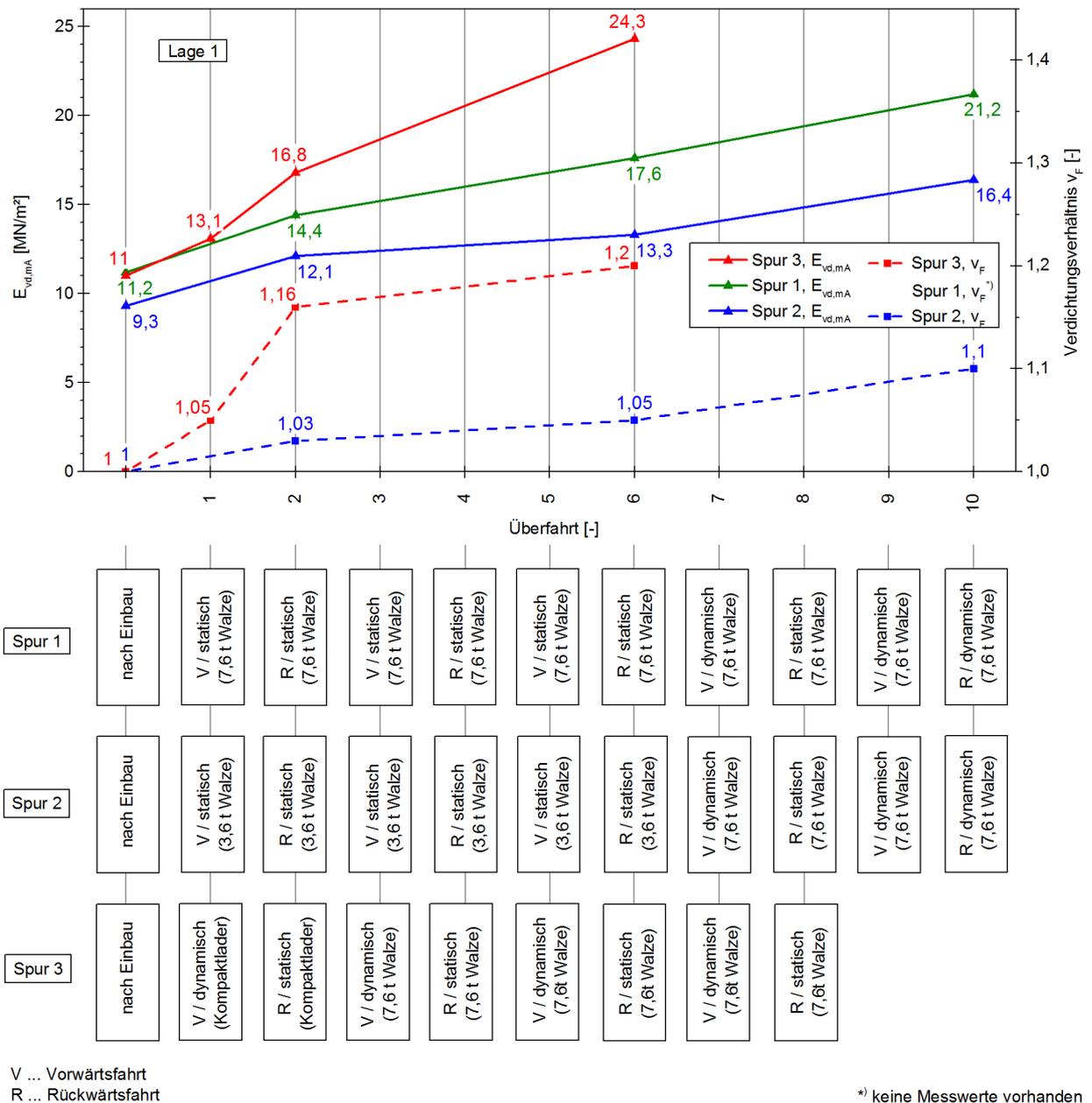


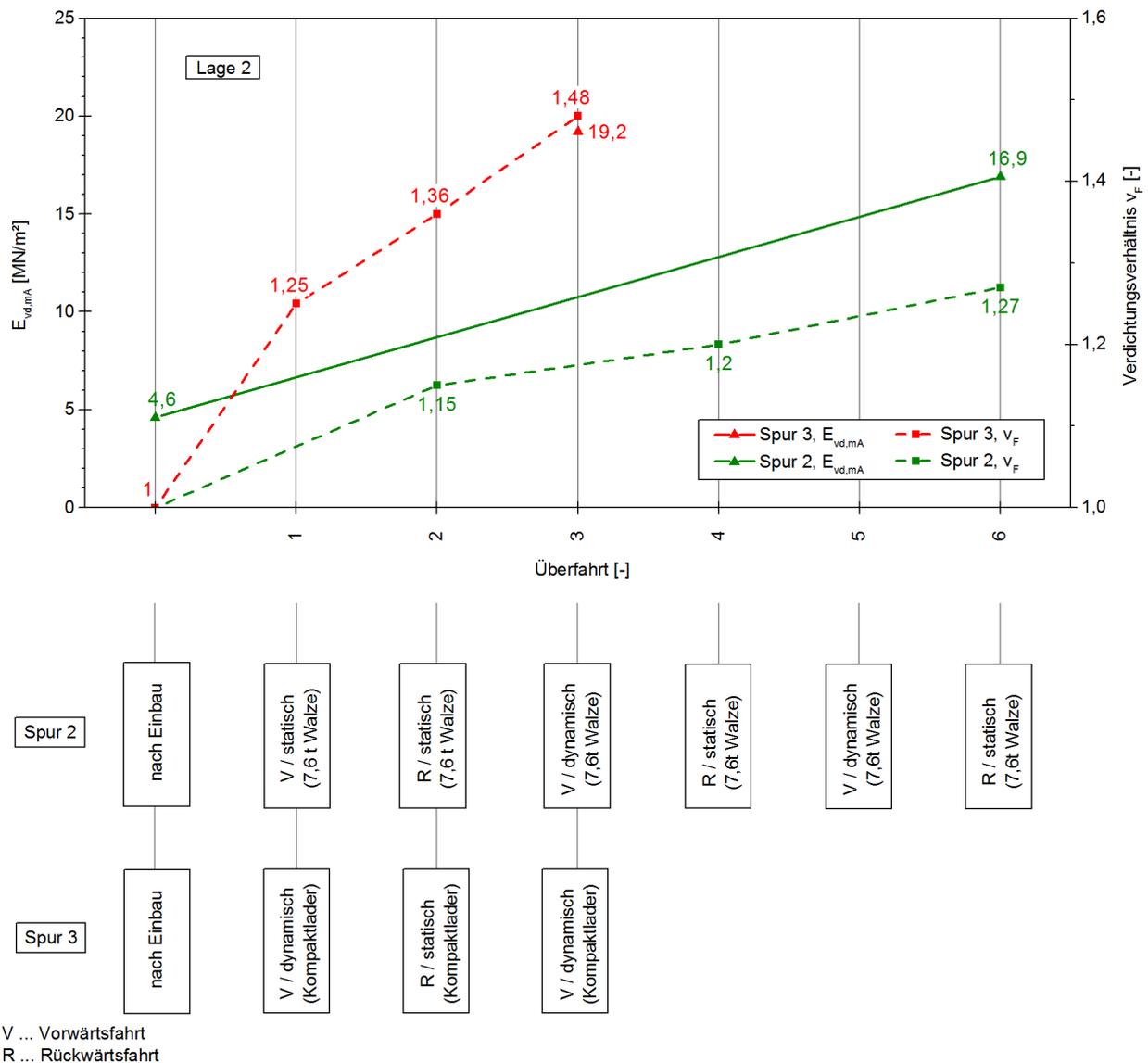
Abbildung 4.23: Vergleich der  $E_{vd}$ -Werte der Lage 1

Es wird angemerkt, dass die Materialvorverdichtung im Rahmen der Materialeinbringung und -verteilung bei der Lage 1 nicht berücksichtigt werden konnte und unter Berücksichtigung dieser Tatsache die in Abb. 4.23 angeführten Verdichtungsverhältnisse  $v_F$  in Wirklichkeit höher waren.

Der Vergleich der dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd,mA}$  (siehe Abb. 4.23) zeigt, dass bei der mit der 3,6 t Walze verdichteten Spur 2 zw. den Überfahrten 2 und 6 nahezu keine Steigerung festzustellen ist. Erst nach weiteren vier Überfahrten mit der 7,6 t Walze konnte der  $E_{vd,mA}$ -Wert gesteigert werden und wurde ein dynamischer Verformungsmodul von  $E_{vd,mA} = 16,4 \text{ MN/m}^2$  erreicht. Die auf der 3,6 t Walze verdichte-

ten Spur gemessenen dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  sind sich im Gegensatz zu den Werten der beiden anderen Spuren am niedrigsten. Der höchste dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  wurde bei der mit Kompaktlader mit Anbauverdichter verdichteten Spur gemessen, wobei aufgrund der Unerfahrenheit des Gerätefahrers bei den ersten Überfahrten kein vollflächiger Kontakt zwischen dem Anbauverdichter und der GSG-Oberfläche hergestellt werden konnte. Es stellte sich somit heraus, dass die 7,6 t Walze und der Kompaktlader mit Anbauverdichter für die Verdichtung von GSG besser geeignet sind, wodurch die 3,6 t Walze ausgeschieden wurde.

Es stellt sich noch die Frage, ob sich die Steifigkeit der GSG-Schichten über das Verdichtungsverhältnis  $v_F$  beurteilen lässt. Betrachtet man beispielsweise die Versuchsergebnisse der Spur 3 (siehe Abb. 4.23) stellt man fest, dass zwischen der Überfahrt 1 und 2 bei einem Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA}$  von  $3,7 \text{ MN/m}^2$  das Verdichtungsverhältnis  $v_F$  von 1:1,05 auf 1:1,16 gesteigert wurde. Nach vier nochmaligen Überfahrten wuchs der  $E_{vd, mA}$ -Wert um weitere  $3,5 \text{ MN/m}^2$  zu, wobei das Verdichtungsverhältnis  $v_F$  von 1:1,16 auf 1:1,20 zunahm. Anhand der Versuchsergebnisse kommt man zur Kenntnis, dass mit dem Verdichtungsverhältnis  $v_F$  nur eine bedingte Aussage über die Steifigkeit einer GSG-Schüttung getroffen werden kann.

4.4.1.3 Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  der Lage 2Abbildung 4.24: Vergleich der  $E_{vd}$ -Werte der Lage 2

Bei der Spur 2 konnte der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  nach sechs Überfahrten mit der 7,6 t Walze von  $E_{vd, mA, Einbau} = 4,6 \text{ MN/m}^2$  auf  $E_{vd, mA} = 16,9 \text{ MN/m}^2$  gesteigert werden, wobei das Verdichtungsverhältnis  $v_F$  1:1,27 betrug. Im Gegensatz dazu wurde bei der Spur 3 nach drei Überfahrten ein  $E_{vd, mA}$ -Wert von  $19,2 \text{ MN/m}^2$  gemessen und das dazugehörige Verdichtungsverhältnis betrug  $v_F = 1,48$ .

Aufgrund der Erfahrung des ersten Tages im Umgang mit dem Kompaktlader erfolgte die Gerätebedienung am darauffolgenden Tag besser und es konnte ein vollflächiger Kontakt zwischen dem Anbauverdichter und der GSG-Oberfläche hergestellt werden. Aufgrund dessen konnte bereits nach drei Überfahrten ein dynamischer Verformungsmodul von  $E_{vd, mA} = 19,2 \text{ MN/m}^2$  erreicht werden. Die Versuchsergebnisse der Lage 2 zeigen, dass sowohl die 7,6 t Walze als auch der Kompaktlader mit Anbauverdichter für die Verdichtung von GSG-Schichten geeignet sind.

#### 4.4.1.4 Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,mA}$ der Lage 3

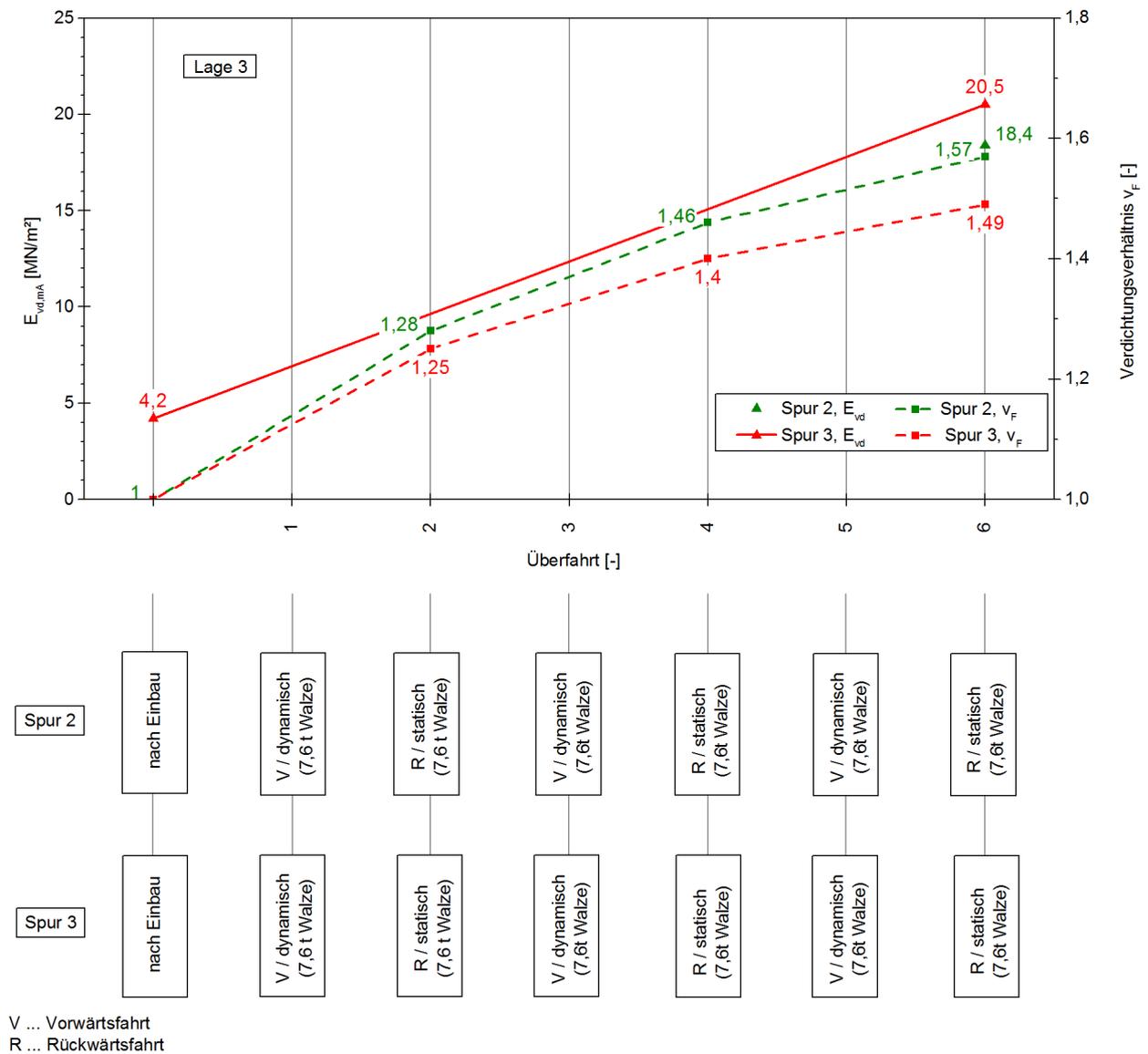


Abbildung 4.25: Vergleich der  $E_{vd}$ -Werte der Lage 3

Vergleicht man die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,mA}$  für beide Spuren der Lage 3, die ausschließlich mit der 7,6 t Walze verdichtet wurden, kann man einen geringfügigen Unterschied feststellen.

#### 4.4.2 Vergleich der Dichten $\rho$ und der Verdichtungsverhältnisse $v_F$

In Tab. 4.8 sind die Dichten und die Verdichtungsverhältnisse gegenübergestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass bei der Ermittlung der Verdichtungsverhältnisse die Effekte zufolge Einbau in Form einer Vorverdichtung nicht berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 4.8: Dichten je Spur und Lage und die Verdichtungsverhältnisse im Feld [21]

		Lage 1			Lage 2		Lage 3	
		Spur 1	Spur 2	Spur 3	Spur 2	Spur 3	Spur 2	Spur 3
$\rho_G$ <sup>1</sup>	[kN/m <sup>3</sup> ]	256	263	296	213	213	234	234
$\rho_{G,v}$ <sup>2</sup>	[kN/m <sup>3</sup> ]	314	292	314	368	326	273	345
$v_F$	[-]	-	1:10	1:1,20	1:1,25	1:1,48	1:1,57	1:49
$\rho_G \times v_F$ <sup>3</sup>	[kN/m <sup>3</sup> ]	-	290	355	266	315	368	349

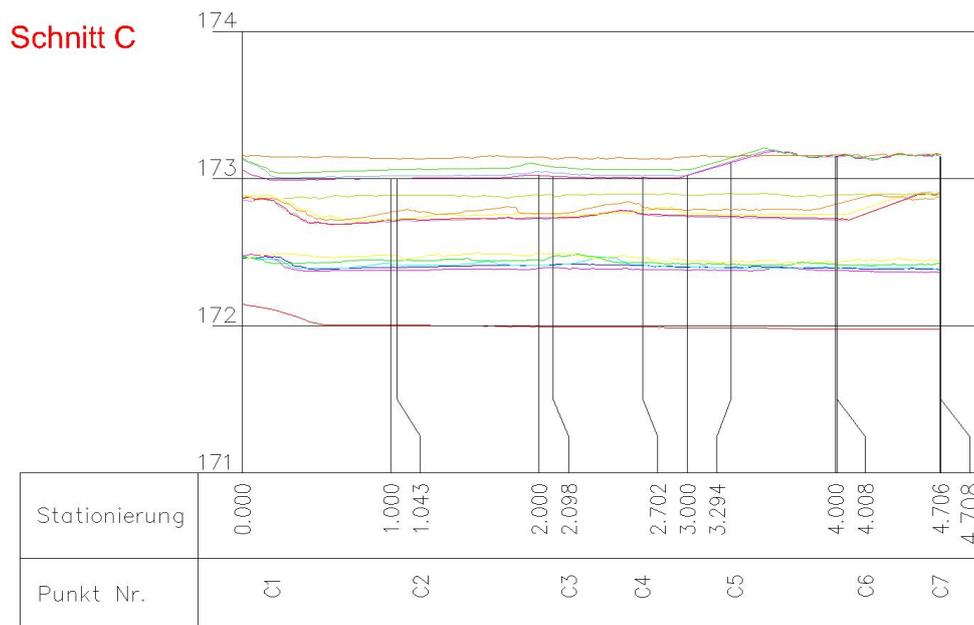
<sup>1</sup> Schüttdichte, Dichte nach Einbau (unverdichtet). Volumenbestimmung mittels Zylindermethode.

<sup>2</sup> Dichte nach Verdichtung. Volumenbestimmung mittels Zylindermethode.

<sup>3</sup> Dichte nach Einbau und Verdichtung. Ergibt sich aus der Multiplikation [1] und [3].

Die Ermittlung der Dichten im Feld erfolgte mittels Zylindermethode. Es stellte sich jedoch heraus, dass es aufgrund der Materialzerkleinerung zu höheren Dichten kam. Daraufhin wurden die Dichten nach Verdichtung  $\rho_{G,v}$  aus dem Produkt der Schüttdichte und des Verdichtungsverhältnisses rechnerisch ermittelt. Diese sind wie erwartet kleiner als die mittels Zylindermethode im Feld der ermittelten Dichten.

Ein weiterer Vergleich zeigt, dass die Verdichtungsverhältnisse der Lage 1 wesentlich geringer sind als jene der Lage 2 und der Lage 3. Betrachtet man den in Abb. (siehe 4.26) dargestellten exemplarischen Querschnitt, stellt man fest, dass es bei der Lage 1 aufgrund der Vorverdichtung zufolge Materialeinbringung und -verteilung zu einer deutlich geringeren Höhenreduktion im Zuge der Verdichtung als bei der Lage 2 und 3 kam. Weiteres zeigt sich, dass es nach jeder Überfahrt mit dem jeweiligen Verdichtungsgerät zu einer Höhenreduktion im Rahmen der Verdichtung der jeweiligen Lage kommt, wobei diese nach der ersten Überfahrt am größten ist und mit jeder weiteren Überfahrt geringer wird. Derselbe Sachverhalt kann auch bei allen anderen Querschnitten festgestellt werden. Dies wird dadurch erklärt, dass mit jedem Verdichtungs Vorgang GSG-Körner gebrochen und dadurch die Poren zwischen den einzelnen Körnern durch die kleineren Körner ausgefüllt werden. Es kommt somit zu einer Kornumlagerung, womit das Korngerüst verbessert und die Höhenreduktion zufolge weiterer Verdichtungs Vorgänge geringer wird.



- Scan 1 — Planum mit Vlies
- Scan 2 — Lage 1 nach Einbau (nach dem Schütten)
- Scan 3 — Lage 1 Spur 3 nach 2 Überfahrten  
Spur 2 nach 2 Überfahrten  
Spur 1 nach 2 Überfahrten
- Scan 4 — Lage 1 Spur 3 nach 6 Überfahrten  
Spur 2 nach 6 Überfahrten  
Spur 1 nach 2 Überfahrten
- Scan 5 — Lage 1 Spur 3 nach 10 Überfahrten  
Spur 2 nach 10 Überfahrten  
Spur 1 nach 6 Überfahrten
- Scan 6 — Lage 1 abwalzen
- Scan 7 — Lage 2 nach Einbau (nach dem Schütten)
- Scan 8 — Lage 2 Spur 3 nach 1 Überfahrt  
Spur 2 nach 2 Überfahrten
- Scan 9 — Lage 2 Spur 3 nach 2 Überfahrten  
Spur 2 nach 4 Überfahrten
- Scan 10 — Lage 2 Spur 3 nach 3 Überfahrten (12.08. um 17:20)  
Spur 2 nach 6 Überfahrten (12.08. um 17:20)
- Scan 11 — Lage 2 Spur 3 nach 3 Überfahrten (13.08. um 07:20)  
Spur 2 nach 6 Überfahrten (13.08. um 07:20)
- Scan 12 — Lage 3 nach Einbau (nach dem Schütten)
- Scan 13 — Lage 3 Spur 3 nach 2 Überfahrten  
Spur 2 nach 2 Überfahrten
- Scan 14 — Lage 3 Spur 3 nach 4 Überfahrten  
Spur 2 nach 4 Überfahrten
- Scan 15 — Lage 3 Spur 3 nach 6 Überfahrten  
Spur 2 nach 6 Überfahrten

Abbildung 4.26: Querschnitt C, [Quelle: Vermessungsbüro Angst]

In Abb. 4.27 wurden die Sieblinien vor und nach Verdichtung dargestellt. Wie bereits erwähnt, kam es bei der Lage 1 sowohl bei der Materialverteilung als auch beim Bergen der Metallzylinder zu einer Kornverfeinerung, die anhand der Sieblinien nachvollzogen werden kann.

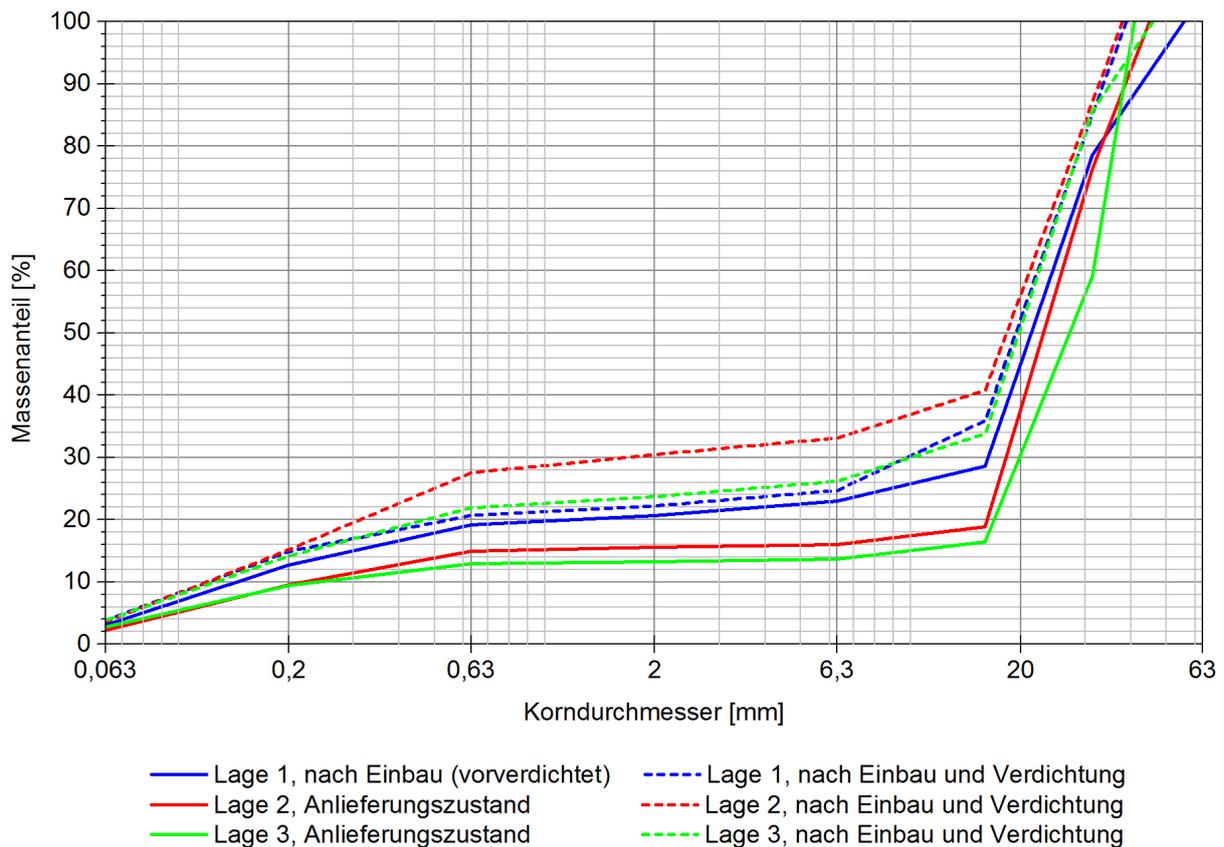


Abbildung 4.27: Vergleich der Sieblinien vor und nach Verdichtung [21]

Weiters ist noch festzustellen, dass das GSG während der Verdichtung in kleinere Körner zerbrach, worauf die Sieblinie optimiert wurde, wodurch es zu einer entsprechenden Verzahnung zwischen den einzelnen Körnern kommt. Daher ist es wichtig, dass das Material während der Verdichtung in kleinere Körner zerbrechen kann. Zu hohe Festigkeitseigenschaften des Materials würden dies erschweren. Bei der Verdichtung muss jedoch darauf geachtet werden, dass es nicht zu einem übermäßigen Kornbruch kommt, da dieser mit einem höheren Materialverbrauch verbunden ist und keine höhere Tragfähigkeit mit sich bringt. Die richtige Intensität der Verdichtung spielt daher eine sehr wichtige Rolle. Im Zuge der Arbeiten am Probefeld zeigte sich, dass die 7,6 t Walze im dynamischen Modus mit der kleinsten Amplitude und einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 2-4 km/h und der Kompaktlader mit Anbauverdichter mit einer Fahrgeschwindigkeit von 1-2 km/h eingesetzt werden sollen. Aufgrund der intensiveren Verdichtungswirkung reduziert sich beim Einsatz des Kompaktladers die Anzahl der Überfahrten. Außerdem soll ein vollflächiger Kontakt des Anbauverdichters mit der GSG-Oberfläche gewährleistet werden, um einen besseren Verdichtungserfolg zu erzielen.

Anhand des Vergleichs des dynamischen Verformungsmoduls mit Verdichtungsverhältnis kommt man zur Kenntnis, dass mit dem Verdichtungsverhältnis  $v_F$  nur eine bedingte Aussage über die Steifigkeit einer GSG-Schüttung getroffen werden kann.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die mechanischen Eigenschaften von GSG für Anwendungen im Straßenbau untersucht, welche sich in drei Hauptteile gliedert.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde eine Zusammenfassung der Literaturrecherche hinsichtlich der Anwendung von GSG im Straßenbau wiedergegeben. Das Ergebnis der Literaturrecherche zeigte, dass in Österreich für die Anwendung von GSG kein Regelwerk existiert. In anderen Ländern beruht die Anwendung von GSG auf eine Materialzulassung wie beispielsweise in Deutschland auf die Zulassung des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt). Als Einbaukriterium wird ein Verdichtungsverhältnis vorgeschrieben, welches eingehalten werden muss, wobei auf die Art des Einbaues und der Verdichtungskontrolle nicht näher eingegangen wird. Außerdem wird von ruhenden Lasten ausgegangen, sodass die Kriterien nicht für den Einsatz von GSG im Straßenbau unter dynamischen Lasten geeignet sind. Mit dieser Arbeit sollen Grundlagen hinsichtlich des Einbaues und der Abnahmeprüfung des Glasschaumgranulats als Leichtschüttmaterial im Straßenbau geschaffen werden, um eine fehlende Normenlage auszugleichen und dessen Anwendung im Straßenbau zu erleichtern.

Der zweite Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit den Laborversuchen, die im Erdbaulaboratorium der TU Wien an zwei verschiedenen Materialtypen Füll 100 und Druck 50 der Firma TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH durchgeführt wurden. Anhand der Versuchsergebnisse können konkrete Empfehlungen zum Einbau und zur Verdichtungskontrolle der eingebauten GSG-Schichten gegeben werden.

Um die Steifigkeit der beiden zu untersuchenden Materialtypen zu ermitteln, wurden je Materialtyp zwei Kompressionsversuche mit zwei unterschiedlichen Verdichtungsgraden zu  $V = 10\%$  und  $V = 25\%$  unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Last-Verformungsverhaltens der Proben durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Verdichtungsverhältnis eine wichtige Rolle für die Steifigkeit der GSG-Proben spielt, sodass sich bei einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  höhere Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  ergeben. Neben dem Verdichtungsverhältnis ist auch die einaxiale Druckfestigkeit ein wichtiger Faktor für die Steifigkeit der GSG-Proben; der Materialtyp mit höheren einaxialen Druckfestigkeiten weist höhere Steifemoduln  $E_{S1}$  auf. Die Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  sind um ein vielfaches größer als jene der Erstbelastung  $E_{S1}$ . Der Grund dafür wird darauf zurückgeführt, dass es im Zuge der Erstbelastung zu einem Abrieb der GSG-Körner kommt und diese sich gegenseitig verspannen. Weiteres konnte im Rahmen der Beurteilung des zeitabhängigen Lastverformungsverhaltens festgestellt werden, dass der Verdichtungsgrad  $V$  und die materialabhängige einaxiale Druckfestigkeit des Einzelkorns  $\sigma_{c,k}$  eine wichtige Rolle für die Größe des Kriechbeiwerts  $C_\alpha$  spielen; je größer der Verdichtungsgrad bzw. die einaxiale Druckfestigkeit, desto geringer ist die Zunahme der Stauchung über die Zeit bzw. desto kleiner ist der Kriechbeiwert  $C_\alpha$ .

Die Bestimmung der Scherfestigkeit von GSG erfolgte, indem kreiszylindrische homogene Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm in einer Triaxialzelle untersucht wurden. Der maximale Korndurchmesser

für beide Materialtypen wurde mit 16 mm gewählt. Als Ergebnis konnte mit Ausnahme des Versuchs ohne Seitenspannung (einaxialer Druckversuch) bei allen drei Versuchen ein Fließen der Proben beobachtet werden, wobei die Stauchungen bei nahezu gleichbleibenden Spannungen zunahmen. Somit kann der Versagensmechanismus als duktil bezeichnet werden. Als Ergebnis kann für die Verzahnungskohäsion  $c$  zwischen den beiden Materialtypen nahezu kein Unterschied festgestellt werden. Jedoch ist der Reibungswinkel  $\varphi$  für den Materialtyp mit höheren einaxialen Druckfestigkeit etwas größer als jener des Materialtyps mit geringeren einaxialen Druckfestigkeiten. Weiters ist noch festzustellen, dass beim Materialtyp G210 (2013) bereits bei geringeren Stauchungen ein Fließzustand erreicht wird. Es wird vermutet, dass dies ebenfalls auf die höhere Trockendichte des Materialtyps G210 (2013) zurückzuführen ist.

Bei den dynamischen Lastplattenversuchen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät wurde ein Versuchsprozedere angewendet, bei dem ein Auflastring um die Lastplatte angeordnet wird. Der Auflastring dient dazu, dass es aufgrund der geringen Dichte des GSG im Zuge der einzelnen stoßförmigen Belastungen nicht zu einer seitlichen Materialerdrängung kommt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Verdichtungsgrad  $V$  einen großen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul hat, sodass bei Proben mit einem höheren Verdichtungsgrad  $V$  höhere dynamische Verformungsmoduln gemessen wurden als bei jenen Proben mit einem geringeren Verdichtungsgrad  $V$ . Eine Änderung der Schichtstärke ist gleichzeitig mit einer Änderung des dynamischen Verformungsmoduls verbunden, sodass sich bei geringeren Schichtstärken höhere Werte für dynamische Verformungsmoduln ergeben bzw. umgekehrt. Der Materialtyp hat einen sehr geringen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul. Anhand der Gegenüberstellung der dynamischen Verformungsmoduln mit und ohne Auflastring um die Lastplatte wurde festgestellt, dass bei den Versuchen mit dem Auflastring um die Lastplatte höhere dynamische Verformungsmoduln gemessen wurden als bei den Versuchen ohne Auflast. Durch die Auflast werden die Auflockerungen im Korngerüst reduziert und somit werden die einzelnen Körner aufgrund ihrer geringen Dichte zufolge stoßförmiger Belastung nicht seitlich verdrängt. Außerdem bleibt die Kornverspannung aufgrund des Auflastringes nach jeder einzelnen stoßförmigen Belastung erhalten. Somit sind die Ergebnisse aussagekräftiger als bei den Versuchen ohne Auflastring um die Lastplatte. Es empfiehlt sich daher bei den dynamischen Lastplattenversuchen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät, das Versuchsprozedere mit dem Auflastring um die Lastplatte anzuwenden.

Der dritte und der letzte Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit den Feldversuchen, die im Zuge des Bauvorhabens Knoten Prater (A4 Ost Autobahn | A23 Südosttangente Wien) durchgeführt wurden. Aufgrund eines nicht vorhandenen Regelwerks für den Einbau sowie der Verdichtungskontrolle von GSG-Schichten wurde anhand eines Probefeldes (A23, Rampe 1) die optimale Einbaumethode bestimmt und verschiedene Methoden zur Beurteilung des Verdichtungsgrades miteinander verglichen.

Im Rahmen der Materialverteilung wurde das GSG überfahren wodurch es zu einer Vorverdichtung des Materials kam. Dies machte sich durch den an der Oberfläche der ersten GSG-Schicht entstehenden Kornabrieb bemerkbar. Diese Materialvorverdichtung kann in der Praxis als Vorteil betrachtet werden, wodurch die Anzahl der Überfahrten mit dem jeweiligen Verdichtungsgerät reduziert werden kann. Sollen jedoch die Effekte aus dem Einbau (Vorverdichtung) aus versuchstechnischen Gründen ausgeschlossen werden, empfiehlt sich eine Materialeinbringung mit dem Löffel des Raupenbaggers von außen des Versuchsfeldes. Anhand der dynamischen Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät stellte sich heraus, dass sowohl die 7,6 t Walze als auch der Kompaktlader mit Anbauverdichter für die Verdichtung von GSG-Schichten geeignet sind. Der Verdichtungserfolg der 3,6 t Walze war jedoch nicht zufriedenstellend. Im Zuge der Arbeiten am Probefeld zeigte sich, dass die 7,6 t Walze im dynamischen Modus mit der kleinsten Amplitude und einer

Fahrgeschwindigkeit von ca. 2-4 km/h und der Kompaktlader mit Anbauverdichter mit einer Fahrgeschwindigkeit von 1-2 km/h eingesetzt werden sollen. Aufgrund der intensiveren Verdichtungswirkung reduzierte sich beim Einsatz des Kompaktladers die Anzahl der Überfahrten. Es soll auf einen vollflächigen Kontakt des Anbauverdichters mit der GSG-Oberfläche geachtet werden, um einen besseren Verdichtungserfolg zu erzielen. Anhand der Sieblinien wurde festgestellt, dass das GSG während der Verdichtung in kleinere Körner zerbrach, worauf die Sieblinie optimiert wurde. Es führte dazu, dass sich eine entsprechende Verzahnung zwischen den einzelnen Körnern einstellte. Daher ist es wichtig, dass das Material während der Verdichtung in kleinere Körner zerbrechen kann. Zu hohe Festigkeitseigenschaften des Materials würden dies erschweren. Bei der Verdichtung muss jedoch darauf geachtet werden, dass es nicht zu einem übermäßigen Kornbruch kommt, da dieser mit einem höheren Materialverbrauch verbunden ist und eine Verminderung der Tragfähigkeit mit sich bringt. Die richtige Intensität der Verdichtung spielt daher eine sehr wichtige Rolle. Es stellte sich noch die Frage, ob sich die Steifigkeit der GSG-Schichten über ein Verdichtungsverhältnis, wie es in den Zulassungen des Deutschen Institutes für Bautechnik verlangt wird, beurteilen lässt. Anhand eines Vergleichs der dynamischen Verformungsmoduln mit den dazugehörigen Verdichtungsgraden wurde festgestellt, dass mit dem Verdichtungsverhältnis  $v_F$  nur eine bedingte Aussage über die Steifigkeit einer GSG-Schüttung getroffen werden kann. Während des Versuchsfeldes stellte sich heraus, dass dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät eine einfache und aussagekräftigere Möglichkeit darstellen, um den Verdichtungserfolg von GSG-Schichten zu beurteilen. Es empfiehlt sich eine Versuchsanordnung mit Auflast um die Lastplatte. Dadurch können aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden.

Damit GSG in Zukunft erfolgreich Anwendung findet, ist eine länderübergreifende Normungsbasis von dringender Notwendigkeit.

# 6 Verzeichnisse

## 6.1 Literatur

- [1] R. Aabøe, E. und J. Hägglund. *Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications*.
- [2] D. Adam. *Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen*. [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_18460.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_18460.pdf). Zugriffsdatum: 03.06.2015.
- [3] D. Adam. „Dynamische und thermomechanische Vorgänge im Boden - Theoretische und experimentelle Untersuchungen“. TU Wien, 2002.
- [4] D. Adam. *Vorlesungsskriptum Grundbau 1*. 2009.
- [5] A. Andreatta u. a. *Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Glasschaumgranulat*. [http://www.publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_99706.pdf](http://www.publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_99706.pdf). Zugriffsdatum: 20.05.2015.
- [6] ASFINAG. *Glasschaumgranulat*. <http://www.asfinag.at/documents/10180/15723/Glasschaumgranulat.pdf/8024dc29-1d8f-4284-80a9-a5d5c66e73fa>. Zugriffsdatum: 15.02.2015.
- [7] R. Baier und D. Rainer. „Verfahren zur Herstellung von Glasschaum unter Wiederverwertung eines Altglasgemisches“. Zugriffsdatum: 03.07.2015.
- [8] Deutsche Bauzeitung. *Wieder-verwendung*. <http://www.db-bauzeitung.de/allgemein/wieder-verwendung/>. Zugriffsdatum: 21.05.2015.
- [9] G. Betti, U. Pinori und A. Marradi. „Glassfoam aggregates for pavements on highly compressive soil. The Fiumicino airport case history“. In: *Donau-Europäische Konferenz für Geotechnik*. Hrsg. von H. Brandl und D. Adam. Bd. 1. TU Wien, Sep. 2014.
- [10] H. Brandl u. a. *Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät, Grundlagenforschung und praktische Anwendung, Heft 533*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie / Straßenforschung, 2003.
- [11] BMVIT Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie. *RVS 08.03.04, Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches - Blatt 0.0*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, BMVIT, Juni 2008.
- [12] M. Dietrich und G. Gold. *Leichtbaustoff Glasschaumgranulat Einsatz an der BAB A 8 bei Bernau am Chiemsee*.
- [13] *DIN 18137-2 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 2: Triaxialversuch*. Apr. 2011.
- [14] *Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Einaxiale Druckfestigkeit*. 1976.
- [15] TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH. *Einbau von Schaumglasschotter - einfach und schnell*. <http://www.technopor.at/produkt-granulat/einbau-verarbeitung/einbau-infos/item/51-einbau-einfach-und-schnell>. Zugriffsdatum: 07.12.2015.

- [16] TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH. *Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Glasschaumgranulat*. <http://www.technopor.at/produkt-granulat/granulat/eigenschaften>. Zugriffsdatum: 20.05.2015.
- [17] TECHNOpor<sup>®</sup> Handels GmbH. *Technische Daten - Perimeter 50*. <http://www.technopor.at/produkt-granulat/planung/technische-daten>. Zugriffsdatum: 20.05.2015.
- [18] *Handbok Skumglas i mark- och vaegbyggnad*. 2008.
- [19] H. Kempert und M. Raithel. *Bodenmechanik und Grundbau*. 2. Auflage. Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2009.
- [20] *ÖNORM B 4420, Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben - Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Kompressionsversuchen*. Jan. 1989.
- [21] B. Peternell. *Ermittlung einer optimalen Einbaumethode von Glasschaumgranulat sowie Vergleich von verschiedenen Methoden zur Beurteilung der Verdichtung von Glasschaumgranulat-Schichten*. 2015.
- [22] GEOCELL Schaumglas. *Technische Daten*. <http://www.geocell-schaumglas.eu/de/schaumglasschotterglasschaum/technische-daten/>. Zugriffsdatum: 03.07.2015.
- [23] Glapor Schaumglasprodukte. *Technische Daten*. <http://www.glapor.de/de/downloads/technischedaten/>. Zugriffsdatum: 03.07.2015.
- [24] H. Schmidt. *Grundlagen der Geotechnik*. 3. Auflage. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2006.
- [25] K. Simmer. *Grundbau*. 19, neubearb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Teubner Verlag, 1994.
- [26] SINTEF. *Triaxialtest von<sup>®</sup> HASOPOR*. Aug. 2001.
- [27] T. Studener. *Vergleich zweier Glasschaumgranulat Produkte anhand von Laboruntersuchungen*. 2015.
- [28] A. Zegowitz. *Glasschaumschotter als Wärmedämmung*. <http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/Schaumglasschotter-Zegowitztcm1021-97648.pdf>. Zugriffsdatum: 07.12.2015.
- [29] Deutsches Institut für Bautechnik Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten - Bautechnisches Prüfamts. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsgegenstand: Schüttungen aus Glasschaumgranulat "TECHNOpor Perimeter 50" als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten*. Dez. 2012.
- [30] Deutsches Institut für Bautechnik Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten - Bautechnisches Prüfamts. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsgegenstand: Schüttungen aus Schaumglas-Schotter "ecoglas" als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten*. Mai 2014.
- [31] Deutsches Institut für Bautechnik Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten - Bautechnisches Prüfamts. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsgegenstand: Schüttungen aus Schaumglas-Schotter "GLAPOR Glasschaumschotter S-G-150" und "GLAPOR Dämmschotter SG-800 P"*. Nov. 2012.
- [32] Deutsches Institut für Bautechnik Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten - Bautechnisches Prüfamts. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsgegenstand: Schüttungen aus Schaumglas-schotter "Misapor 10/50" und "Misapor 10/75" als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten*. Dez. 2012.
- [33] Deutsches Institut für Bautechnik Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten - Bautechnisches Prüfamts. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - Zulassungsgegenstand: Wärmedämmstoff aus Schaumglasschotter "GEOCELL Schaumglas S"*. Mai 2013.

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

2.1	Glasschaumgranulat [8] . . . . .	3
2.2	links: Anlieferung per LKW, rechts: Anlieferung in Big Bags [15] . . . . .	4
2.3	links: Glaspulver-Treibmittelgemisch auf Endlosband aus Edelstahl, rechts: fertiger „Kuchen“ [Fotos: TECHNOpor®] . . . . .	5
2.4	links: GSG hergestellt mit Trockenschäumverfahren, rechts: mit Nassschäumverfahren [28] . . . . .	5
3.1	Sieblinien der beiden Materialtypen im Anlieferungszustand . . . . .	12
3.2	Probekörper; links: des Materialtyps G150 (2013), rechts: des Materialtyps G210 (2013) [27] . . . . .	16
3.3	Druckversuche - Arbeitslinie für den Materialtyp G150 [27] . . . . .	16
3.4	Druckversuche - Arbeitslinie für den Materialtyp G210 [27] . . . . .	17
3.5	Probekörper vor und nach dem einaxialen Druckversuch (exemplarisch) [27] . . . . .	17
3.6	Probekörper vor und nach dem einaxialen Druckversuch (exemplarisch) [27] . . . . .	18
3.7	Verdichtung der Probe mittels Proctorhammer und lastverteilender Platte . . . . .	20
3.8	Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G150 (2013) V10 in Abhängigkeit der Zeit . . . . .	23
3.9	Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G210 (2013) V10 in Abhängigkeit der Zeit . . . . .	23
3.10	Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G150 (2013) V25 in Abhängigkeit der Zeit . . . . .	24
3.11	Laststufen, Normalspannungen und Verformungen der Probe G210 (2013) V25 in Abhängigkeit der Zeit . . . . .	24
3.12	Spannungs-Stauchungs-Diagramme der Proben . . . . .	27
3.13	Zusammenhang zwischen den Steifemoduln der Erstbelastung $E_{S1}$ sowie der Wiederbelastung $E_{S2}$ und der Normalspannung $\sigma$ für verschiedene Probekörper . . . . .	28
3.14	Zeit-Stauchungs-Diagramm für die Laststufe mit einer Spannung von $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$ je Probe . . . . .	29
3.15	Zeit-Stauchungs-Diagramm für die Laststufe mit einer Spannung von $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$ je Probe . . . . .	30
3.16	Probekörper a) Spannungen b) Änderungen der Probeabmessung während des triaxialen Druckversuchs [25] . . . . .	32
3.17	Kornverteilungslinien der Materialien G150 (2013) und G210 (2013) im Anlieferungszustand sowie der Probekörper der Triaxialversuche . . . . .	33
3.18	Kornfraktionen zur Herstellung der Proben des Materials G210 (2013) . . . . .	34
3.19	links: Mit Gips abgegliche Oberseite der Probe in der zylindrischen Form, rechts: fertiger Probekörper . . . . .	34
3.20	Probe in Triaxialzelle für einen einaxialen Druckversuch . . . . .	35
3.21	Arbeitslinien der Proben des Materialtyps G150 (2013) . . . . .	36
3.22	Arbeitslinien der Proben des Materialtyps G210 (2013) . . . . .	37
3.23	p-q-Diagramm der Proben des Materialtyps G150 (2013) . . . . .	38
3.24	p-q-Diagramm der Proben des Materialtyps G210 (2013) . . . . .	39
3.25	Darstellung des Versagenskriteriums im p-q-Diagramm [4] . . . . .	39
3.26	Komponenten des Leichten Fallgewichtsgerätes [11] . . . . .	41
3.27	Versuchsbehälter mit situierten Erddruckdosen zur Durchführung von dynamischen Lastplattenversuchen . . . . .	43

3.28	Versuchsaufbau ohne Auflast [Steurer, unveröffentlicht] . . . . .	45
3.29	Dynamische Verformungsmoduln $E_{vd_i}$ [Steurer, unveröffentlicht] . . . . .	46
3.30	Gemessene vertikale und horizontale Spannungen mittels der Erddruckdosen EH & EV [Steurer, unveröffentlicht] . . . . .	48
3.31	Dynamischer Verformungsmodul $E_{vd}$ in Abhängigkeit von der Trockendichte $\rho_d$ der Proben [Steurer, unveröffentlicht] . . . . .	49
3.32	Versuchsaufbau mit Auflastring um die Lastplatte . . . . .	50
3.33	Dynamische Verformungsmoduln $E_{vd,MA,i}$ mit Auflast um die Lastplatte . . . . .	52
3.34	Messdaten der Erddruckdosen . . . . .	54
3.35	Dynamischer Verformungsmodul $E_{vd,MA,4\div 6}$ in Abhängigkeit von der Trockendichte $\rho_d$ der Proben . . . . .	55
4.1	Querschnitt GSG [6] . . . . .	59
4.2	links: Tandemwalze Glattmantelbandagen Bomag BW 135 AD (3,6 t), rechts: Tandemwalze Glattmantelbandagen Bomag BW 151 AD-2 (7,6 t) . . . . .	60
4.3	links: Kompaktlader mit Anbauverdichter Stehr SBV80 HC3, rechts: Kompaktlader mit la- sergesteuertem Planierschild . . . . .	60
4.4	Anlieferung GSG lose per LKW (ca. 90 m <sup>3</sup> ) . . . . .	61
4.5	Vlies als Trennschicht zwischen Planum und GSG . . . . .	62
4.6	oben: Grundriss der Lage 1, unten: Schnitt Achse C, [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien] . . . . .	62
4.7	Volumenbestimmung mittels Zylindermethode . . . . .	63
4.8	Versuchsdurchführung mit Auflastring um die Lastplatte . . . . .	63
4.9	$E_{vd,MA}$ -Werte für Lage 1 Spur 1 . . . . .	64
4.10	$E_{vd,MA}$ -Werte für Lage 1 Spur 2 . . . . .	65
4.11	$E_{vd,MA}$ -Werte für Lage 1 Spur 3 . . . . .	66
4.12	oben: Grundriss der Lage 2, unten: Schnitt Achse C, [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien] . . . . .	68
4.13	Materialeinbringung mit Raupenbagger von außen des Versuchsfeldes . . . . .	68
4.14	$E_{vd}$ -Werte für Lage 2, Spur 2 . . . . .	70
4.15	$E_{vd}$ -Werte für Lage 2, Spur 3 . . . . .	71
4.16	Vergleich der Längsschnitte für Lage 2 Spur 2 . . . . .	72
4.17	Vergleich der Längsschnitte für Lage 2 Spur 3 . . . . .	73
4.18	Änderung der $E_{vd}$ -Werte über Nacht . . . . .	74
4.19	oben: Grundriss der Lage 3, unten: Schnitt Achse C, [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien] . . . . .	76
4.20	$E_{vd}$ -Werte für Lage 3, Spur 2 . . . . .	77
4.21	$E_{vd}$ -Werte für Lage 3, Spur 3 . . . . .	78
4.22	Vergleich der $E_{vd}$ -Werte gemessen unmittelbar nach dem Einbau . . . . .	80
4.23	Vergleich der $E_{vd}$ -Werte der Lage 1 . . . . .	81
4.24	Vergleich der $E_{vd}$ -Werte der Lage 2 . . . . .	83
4.25	Vergleich der $E_{vd}$ -Werte der Lage 3 . . . . .	84
4.26	Querschnitt C, [Quelle: Vermessungsbüro Angst] . . . . .	86
4.27	Vergleich der Sieblinien vor und nach Verdichtung [21] . . . . .	87

### 6.3 Tabellenverzeichnis

2.1	Empfehlungen für Verdichtung von Glasschaumgranulat [18] . . . . .	7
3.1	Bezeichnung der untersuchenden Materialtypen . . . . .	11
3.2	Reindichte $\rho_r$ je Materialtyp [27] . . . . .	14
3.3	Rohdichten $\rho_s$ der untersuchten Materialtypen [27] . . . . .	14
3.4	Porenanteile im Einzelkorn $n_s$ [27] . . . . .	15
3.5	Vergleich der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche [27] . . . . .	19
3.6	Übersicht zu den Probekörpern der Kompressionsversuche . . . . .	21
3.7	Porenanteile $n$ mit den dazugehörigen Trockendichten $\rho_d$ für alle Probekörper . . . . .	21
3.8	Übersicht zu den Belastungsstufen der Kompressionsstufen . . . . .	22
3.9	Stauchungen und Steifemoduln für die Probe G150 (2013) V10 . . . . .	25
3.10	Ermittlung der Kriechbeiwerte $C_\alpha$ der Laststufe mit einer Spannung von $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$ je Probe . . . . .	29
3.11	Ermittlung der Kriechbeiwerte $C_\alpha$ für $\sigma=300 \text{ kN/m}^2$ . . . . .	30
3.12	Vergleich der Kriechbeiwerte $C_\alpha$ für die Laststufen mit einer Spannung von $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$ und $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$ . . . . .	31
3.13	Massenanteile je Kornfraktion für G150 (2013) und G210 (2013) . . . . .	33
3.14	Probekörperabmessungen und die dazugehörigen Massen der Probekörper . . . . .	35
3.15	Seitenspannung $\sigma_3$ je Versuch und Materialtyp G150 (2013) & G210 (2013) . . . . .	36
3.16	Vergleich der Bruchspannungen und der Bruchdehnungen . . . . .	37
3.17	Parameter $\alpha$ und $b$ und die daraus abgeleiteten Scherparameter $\varphi$ und $c$ je Materialtyp . . . . .	40
3.18	Übersicht der Proben, [Steurer, unveröffentlicht] . . . . .	44
3.19	Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,i}$ der Probekörper . . . . .	47
3.20	Übersicht der Proben . . . . .	51
3.21	Vergleich der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd,i}$ der Probekörper mit Auflast . . . . .	52
3.22	Gegenüberstellung der dynamischen Verformungsmoduln $E_{vd}$ und $E_{vd,mA}$ . . . . .	56
3.23	Gegenüberstellung der Zuwächse der dyn. Verformungsmoduln $E_{vd}$ und $E_{vd,mA}$ mit und ohne Auflast um die Lastplatte . . . . .	57
3.24	Vergleich der max. Vertikalspannungen der Versuche mit und ohne Auflast . . . . .	57
4.1	$E_{vd}$ -Werte des Planums in $\text{MN/m}^2$ [Quelle: Institut für Geotechnik, TU Wien] . . . . .	61
4.2	Verdichtung der Lage 1 . . . . .	64
4.3	Rohdichten und Verdichtungsverhältnisse $\rho_{v,F}$ der Lage 1 [21] . . . . .	67
4.4	Verdichtung der Lage 2 . . . . .	69
4.5	Schichthöhen SH, Rohdichten und Verdichtungsverhältnisse $\rho_{v,F}$ der Lage 2 [21] . . . . .	75
4.6	Verdichtung der Lage 3 . . . . .	76
4.7	Schichthöhen SH, Rohdichten und Verdichtungsverhältnisse $\rho_{v,F}$ der Lage 3 [21] . . . . .	79
4.8	Dichten je Spur und Lage und die Verdichtungsverhältnisse im Feld [21] . . . . .	85