

Grundlagenforschung  
Glasschaumgranulatschüttungen als  
lastabtragender und wärmedämmender  
Baustoff

Glasschaumgranulat

D. Adam, A. Andreatta, W. Feist, J. Feix, M. Ihle,

M. Bianchi Janetti, F. Ochs, R. Pfluger,

A. Steurer, H. Weiß

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**00/2010**

**Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# Grundlagenforschung Glasschaumgranulatschüttungen als lastabtragender und wärmedämmender Baustoff

## Glasschaumgranulat

Universität Innsbruck

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

AB: Massivbau und Brückenbau

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Andreatta

Univ.Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix

Universität Innsbruck

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

AB: Energieeffizientes Bauen

Univ.Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Feist

Dipl.-Ing. Michele Bianchi Janetti

Dr.-Ing. Fabian Ochs

Dr.-Ing. Rainer Pfluger

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Technische Universität Wien

Institut für Geotechnik

FB: Grundbau, Boden- und Felsmechanik

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

Dipl.-Ing. Armin Steurer

Technopor Handels GmbH

Dipl.-Ing. Michael Ihle

Dipl.-Ing. Holger Weiß

Innsbruck, 31.03.2014

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie





## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

# Vorwort der Autoren

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Grundlagenforschung an Glasschaumgranulatschüttungen als lastabtragender und wärmedämmender Baustoff“.

Glasschaumgranulat ist ein Recyclingbaustoff, der aus Altglas hergestellt wird und alle Anforderungen an einen ökologischen Baustoff erfüllt.

Ziel des Forschungsprojekts war es, die Eigenschaften von Glasschaumgranulat als lastabtragende und zugleich wärmedämmende Schicht unter lastabtragenden Bauteilen wissenschaftlich zu untersuchen, um so die notwendigen Grundlagen zu schaffen, damit das Material in der Praxis sicher, wirtschaftlich und anwenderfreundlich am Standardmarkt eingesetzt werden kann.

Aktuell stellt sich die Situation so dar, dass die Anwendung von Glasschaumgranulat beispielsweise in Deutschland auf einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung basiert, deren Messmethoden das reale Materialverhalten unzureichend beschreiben. Die Entwicklung von neuen Messmethoden und von neuen Beurteilungskriterien hinsichtlich der erforderlichen Materialeigenschaften stellt aufgrund der fehlenden Kenntnisse in diesem Bereich einen grundlagenorientierten Forschungsprozess dar. Die Nachfrage für einen derartigen ökologischen Baustoff am Markt ist als sehr hoch einzuschätzen, wodurch auch die Praxisrelevanz gegeben ist.

Um die oben dargestellten Ziele des Forschungsprojektes erreichen zu können, hat sich ein Konsortium bestehend aus der Universität Innsbruck / Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften mit den Arbeitsbereichen Massivbau und Brückenbau bzw. Energieeffizientes Bauen, der Technischen Universität Wien / Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, und dem Industriepartner, der Technopor Handels GmbH, zusammengeschlossen.

# Inhaltsverzeichnis

|        |                                                                                                                                                                                                             |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1      | Einleitung.....                                                                                                                                                                                             | 17 |
| 2      | Hintergrundinformationen zum Projektinhalt .....                                                                                                                                                            | 18 |
| 2.1    | Beschreibung des Standes der Technik.....                                                                                                                                                                   | 18 |
| 2.2    | Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema.....                                                                                                                                                                 | 20 |
| 2.3    | Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand<br>(Innovationsgehalt des Projekts).....                                                                                           | 20 |
| 2.4    | Verwendete Methoden.....                                                                                                                                                                                    | 21 |
| 2.5    | Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten mit<br>Quellenangabe, Erläuterung der Erhebung.....                                                                                                | 21 |
| 3      | Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen.....                                                                                                                                                        | 23 |
| 3.1    | Grundlagen.....                                                                                                                                                                                             | 23 |
| 3.2    | Laboruntersuchungen am Einzelkorn.....                                                                                                                                                                      | 24 |
| 3.2.1  | Ermittlung der Reindichte $\rho_r$ .....                                                                                                                                                                    | 24 |
| 3.2.2  | Ermittlung der Rohdichte $\rho_s$ und des zugehörigen Porenanteils $n_s$ .....                                                                                                                              | 25 |
| 3.2.3  | Einaxialer Druckversuch.....                                                                                                                                                                                | 27 |
| 3.2.4  | Frostbeständigkeit Einzelkorn.....                                                                                                                                                                          | 52 |
| 3.3    | Laboruntersuchungen am Korngemisch .....                                                                                                                                                                    | 54 |
| 3.3.1  | Beschreibung des Korngemischs anhand des Einheitswürfels .....                                                                                                                                              | 54 |
| 3.3.2  | Korngrößenverteilung im Anlieferungszustand .....                                                                                                                                                           | 56 |
| 3.3.3  | Ermittlung der Schüttdichte $\rho_{d,G}$ und des zugehörigen Porenanteils $n_s$ .....                                                                                                                       | 57 |
| 3.3.4  | Kompressionsversuche - Oedometerquerschnitt $\varnothing 250$ mm –<br>Kurzzeitversuch.....                                                                                                                  | 58 |
| 3.3.5  | Ermittlung der Kornverfeinerungen der Proben zufolge der Verdichtung<br>und während der Laststeigerung im Zuge der Kurzzeit-<br>Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Durchmesser von 250<br>mm ..... | 67 |
| 3.3.6  | Kompressionsversuche - Oedometerquerschnitt $\varnothing 250$ mm –<br>Langzeitversuch .....                                                                                                                 | 75 |
| 3.3.7  | Kompressionsversuche – Oedometerquerschnitt 500 mm x 500 mm –<br>Kurzzeitversuch.....                                                                                                                       | 82 |
| 3.3.8  | Kompressionsversuche – Oedometerquerschnitt 500 mm x 500 mm –<br>Langzeitversuch .....                                                                                                                      | 84 |
| 3.3.9  | Kompressionsversuche im Vergleich.....                                                                                                                                                                      | 89 |
| 3.3.10 | Scherversuche im Rahmenschergerät – TU Freiberg.....                                                                                                                                                        | 91 |

|        |                                                                                                                                                     |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.11 | Scherversuche im Rahmenschergerät – TU Wien .....                                                                                                   | 93  |
| 3.3.12 | Scherversuche im Triaxialgerät .....                                                                                                                | 96  |
| 3.3.13 | Bestimmung der Kornverfeinerung .....                                                                                                               | 105 |
| 3.3.14 | Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit .....                                                                                                        | 107 |
| 3.3.15 | Ermittlung der Durchlässigkeit .....                                                                                                                | 108 |
| 3.4    | Großmaßstäbliche Versuche UIBK .....                                                                                                                | 108 |
| 3.4.1  | Grundlagen .....                                                                                                                                    | 108 |
| 3.4.2  | Kurzzeitversuche .....                                                                                                                              | 115 |
| 3.4.3  | Versuche zur Tragfähigkeit von GSG-Schichten .....                                                                                                  | 136 |
| 3.4.4  | Langzeitversuche .....                                                                                                                              | 140 |
| 3.5    | Dynamischer Lastplattenversuch – Untersuchungen unter Laborbedingungen ....                                                                         | 145 |
| 3.5.1  | Versuche ohne Auflast .....                                                                                                                         | 145 |
| 3.5.2  | Versuche mit Auflaststring rund um die Lastplatte .....                                                                                             | 151 |
| 3.5.3  | Vergleich zwischen den Versuchen mit und ohne Auflaststring .....                                                                                   | 156 |
| 3.6    | Dynamischer Lastplattenversuch – Felduntersuchungen .....                                                                                           | 161 |
| 4      | Zusammenfassung der Ergebnisse in Hinblick auf die Arbeitspakete .....                                                                              | 165 |
| 4.1    | AP1 – Versuche UIBK .....                                                                                                                           | 165 |
| 4.2    | AP2 – Setzungen .....                                                                                                                               | 165 |
| 4.3    | AP3 – Bettungsmodul .....                                                                                                                           | 171 |
| 4.4    | AP4 – Grundbruch .....                                                                                                                              | 172 |
| 4.4.1  | Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – Grundbruch .....                                                                                  | 173 |
| 4.4.2  | Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – Grundbruch bei<br>Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit zwischen GSG und<br>Boden ..... | 175 |
| 4.4.3  | Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – Grundbruch<br>Zusammenfassung .....                                                               | 177 |
| 4.5    | AP5 – Gleiten .....                                                                                                                                 | 178 |
| 4.5.1  | Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit - Gleiten .....                                                                                     | 178 |
| 4.6    | AP6 – Messung der Wärmeleitfähigkeit .....                                                                                                          | 183 |
| 4.6.1  | Ziele .....                                                                                                                                         | 183 |
| 4.6.2  | Ein-Platten-Messapparatur .....                                                                                                                     | 184 |
| 4.6.3  | Methode .....                                                                                                                                       | 189 |
| 4.6.4  | Versuchsablauf .....                                                                                                                                | 189 |
| 4.6.5  | Auswertung der Wärmeleitfähigkeitsmessung .....                                                                                                     | 189 |

|       |                                                                                                                                                   |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6.6 | Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung .....                                                                                                   | 190 |
| 4.6.7 | Validierung .....                                                                                                                                 | 195 |
| 4.6.8 | Fehlerrechnung .....                                                                                                                              | 196 |
| 4.6.9 | Messung feuchter Proben .....                                                                                                                     | 197 |
| 4.7   | AP7 – Messdatenauswertung, mathematische Modellbildung und Weiterentwicklung.....                                                                 | 197 |
| 4.7.1 | Modellierung der Wärmeleitfähigkeit.....                                                                                                          | 197 |
| 4.7.2 | Modellierung des Einflusses von Feuchte.....                                                                                                      | 207 |
| 4.8   | AP8 – Ergänzungsversuche TU Wien.....                                                                                                             | 214 |
| 4.9   | AP9 – Feldversuche .....                                                                                                                          | 214 |
| 5     | Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms.....                                                                                           | 215 |
| 5.1   | Einpassung in das Programm .....                                                                                                                  | 215 |
| 5.2   | Beitrag zum Gesamtziel des Programms.....                                                                                                         | 215 |
| 5.3   | Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt..... | 216 |
| 5.4   | Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse.....                 | 216 |
| 6     | Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen .....                                                                                                | 217 |
| 7     | Ausblick und Empfehlungen .....                                                                                                                   | 223 |
| 7.1   | Ausblick .....                                                                                                                                    | 223 |
| 7.2   | Empfehlungen .....                                                                                                                                | 223 |
| 8     | Literaturverzeichnis .....                                                                                                                        | 223 |
| 9     | Anhang.....                                                                                                                                       | 225 |
| 9.1   | Messwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10 (23/50)}$ , $\lambda_{10 (23/80)}$ .....                                                             | 225 |
| 9.2   | Nennwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D$ , Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_r$ .....                                             | 225 |

# **Kurzfassung**

## **Ausgangssituation/Motivation**

Bislang existieren in der Praxis für den Planer nur unzureichende Grundlagen, um das Tragverhalten von Glasschaumgranulatschichten hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit beurteilen zu können. Das Fehlen von Messmethoden zur richtigen Beurteilung der effektiven Wärmeleitfähigkeit führt weiters dazu, dass das Material im Vergleich zu anderen Dämmstoffen schlechter bewertet wird. Daraus resultiert, dass das Material in der Praxis bis dato nur bei wenigen, kleinen Bauvorhaben und unter Berücksichtigung von großen Sicherheiten eingesetzt wird. Ohne wissenschaftlich fundierte Aussagen über das Tragverhalten bzw. der Wärmeleitfähigkeit ist der Einsatz von Glasschaumgranulat im Standardmarkt nicht möglich.

## **Inhalte und Zielsetzungen**

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Eigenschaften von Glasschaumgranulat als lastabtragende (mechanische Eigenschaften) und zugleich wärmedämmende Schicht (bauphysikalische Eigenschaften) unter lastabtragenden Bauteilen wissenschaftlich zu untersuchen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können die notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden, um das Produkt Glasschaumgranulat als lastabtragende und zugleich wärmedämmende Gründungslösung vom Nischenmarkt in den Standardmarkt überzuführen, womit ein wichtiger Beitrag hinsichtlich der vom Förderprogramm „Haus der Zukunft plus“ geforderten Ziele (Sicherheit der Energieversorgung, Reduktion der treibhausrelevanten Emissionen im Gebäudesektor etc.) geleistet werden kann.

## **Methodische Vorgehensweise**

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wurden an der Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Laboruntersuchungen am Einzelkorn sowie am Korngemisch durchgeführt. Ergänzend wurde an der Universität Innsbruck das Last- Verformungsverhalten von verdichteten Glasschaumgranulatschichten anhand von großmaßstäblichen Versuchen untersucht. Weiters wurden im Rahmen von diversen Bauvorhaben von der Firma Technopor Handels GmbH Untersuchungen der fertig eingebauten Glasschaumgranulatschichten mit dynamischen Lastplattenversuchen durchgeführt.

Eine innovative Ein-Platten-Messapparatur ermöglichte die Untersuchung des Einflusses des Verdichtungsgrads, der Temperatur und des Wassergehalts auf die Wärmeleitfähigkeit der Glasschaumgranulatschüttung. Die Probe konnte in der Apparatur verdichtet und unter Vakuum untersucht werden. Die Wärmestromrichtung war von oben nach unten gerichtet, um den realen Einbaubedingungen zu entsprechen. Damit wurde Konvektion in der Schüttung ausgeschlossen. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit in der Ein-Platten-Apparatur erfolgte im trockenen Zustand für drei verschiedene Schüttdichten, welche durch Komprimierung unter Verwendung der Hydropulsmaschine erreicht wurden.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Klassifizierung verschiedener GSG-Produkte erfolgte bis dato auf Basis der Schüttdichte, welche jedoch nur eine geringe Aussagekraft hinsichtlich des Last-Verformungsverhalten von GSG-Schichten aufweist. Vielmehr sollten die Materialien auf Basis der zugehörigen einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  benannt werden.

Für die Steifigkeit von GSG-Schichten ist das Maß der Verdichtung von maßgebender Bedeutung. Unabhängig vom Material, von der Schichtstärke oder von der Art des Einbaues (1- oder 2-lagig) resultiert aus einer stärkeren Verdichtung ein steiferes Verhalten der GSG-Schicht. In der Praxis sollte somit auf eine einwandfreie Verdichtung der GSG-Schicht besonders Wert gelegt werden.

Die im Zuge des Forschungsvorhabens ermittelten Steifemoduln (Erstbelastung) liegen in Abhängigkeit von der Spannung und des Materials in einem Bereich von  $E_{S1} = 1,0 \div 6,0 \text{ MN/m}^2$ .

Die mit der neuen Ein-Platten-Apparatur gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit vom Glasschaumgranulat liegen im Bereich von  $0,08 \text{ W/(m K)}$  bis  $0,1 \text{ W/(m K)}$  und streuen damit relativ stark. Die Streuung nimmt mit zunehmender Verdichtung ab. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei verdichteten Schüttungen bei etwa  $0,08 \text{ W/(m K)}$  (Messwert der Wärmeleitfähigkeit). Die Wärmeleitfähigkeit vom Glasschaumgranulat nimmt mit zunehmender Temperatur leicht zu. Die Wärmeleitfähigkeit steigt bei geringen Temperaturen, d.h.  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und kleiner, näherungsweise linear mit zunehmender Feuchte. Bei einem Feuchtegehalt von 20 Vol% erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit auf etwa  $0,15 \text{ W/(m K)}$  bis  $0,2 \text{ W/(m K)}$ . Die Wärmeleitfähigkeit von Glasschaumgranulat nimmt mit zunehmender Verdichtung leicht ab, allerdings nimmt bei gleich bleibender Materialmenge der thermische Widerstand der Probe ab, da die Dicke der Probe beim Verdichten entsprechend geringer wird. Aus thermischer Sicht sollte entsprechend die Verdichtung so gering wie möglich ausfallen. Die vorgestellten mathematischen Modelle können gut die Messwerte von trockenen Proben und von Proben mit geringem Wassergehalt nachbilden. (Für höhere Wassergehalte kann das Modell von [Ochs 2010] verwendet werden)

## Ausblick

Die gewonnen Erkenntnisse dienen als Grundlage für weiterführende Arbeiten hinsichtlich der Entwicklung eines standardisierten Prozederes für die Klassifizierung von GSG. Weiters dienen die durchgeführten Arbeiten als Grundlage für eine wissenschaftliche Untersuchung des Baustoffes GSG im Rahmen einer Dissertation.

Aufgrund der im Forschungsvorhaben festgestellten schwankenden Eigenschaften der Produkte werden Arbeiten zur Sicherstellung der Kontinuität der Qualität der Materialien im Zuge des Produktionsprozesses empfohlen.

Weitere Untersuchungen mit Schwerpunkt auf den Einsatz von Glasschaumgranulat als Dämmstoff für große unterirdische Wärmespeicher folgen im Rahmen des FFG Projekts



store4grid. Dafür wurde die Ein-Platten-Messapparatur so erweitert, dass die Wärmestromrichtung geändert werden kann (durch Drehung der ganzen Apparatur). Damit wird die Untersuchung des Konvektionseinflusses auf der Wärmeleitfähigkeit der Schüttung ermöglicht. Dies stellt einen Vorteil in Vergleich zu vorigen Arbeiten [Ochs 2010] dar, bei denen eine Zwei-Platten-Apparatur verwendet wurde. Es soll im Rahmen des FFG Projekts store4grid der Einfluss der Feuchte weiter untersucht werden und zudem der Anteil der Konvektion bei Schüttungen mit Wärmestromrichtung von unten nach oben ermittelt werden.

Für die Beurteilung der tatsächlichen effektiven Wärmeleitfähigkeit im eingebauten Zustand ist der zeitliche Verlauf der relativen Feuchte der Schaumglasgranulat-Schüttung entscheidend. Dafür sind in-situ Messungen über einen Zeitraum von min. 3 Jahren in einer relevanten Anzahl notwendig. Dies sollte in zukünftigen Projekten untersucht werden.

# **Abstract**

## **Initial Situation / Motivation**

Hitherto foam glass aggregate (FGA) has been used only for a small range of applications because its characteristic mechanical and thermal parameters have not been determined systematically in detail up to now. There have been no data available for FGA layers beneath foundations of buildings which are essential for ultimate limit state design and serviceability state design. In order to evaluate the insulation of the building shell as precisely as possible the knowledge of the effective thermal conductivity of the insulation in use is essential as well. Currently for foam glass aggregate layers no custom measurement and testing procedures are applicable. Without scientific basics with respect to the mechanical and thermal behaviour the application of this innovative material cannot be standardized and widely used.

## **Contents and Objectives**

The aim of the intended scientific investigations was to find and to define characteristic parameters of foam glass aggregate applied as load bearing layer and thermal insulation beneath building foundations. In the case of a successful realization of the research project an important goal for the establishment of the innovative product foam glass aggregate as standard solution at the interface between building and ground could be attained.

## **Methodology**

At the University of Innsbruck an experimental setup has been developed, which enables the measurement of the load deformation behaviour of glass foam aggregate layers. In this test procedure glass foam aggregate layers with different material strengths and compaction degrees are loaded up to 800 kPa in steps of 100 kPa. In the course of these experiments the force of the hydraulic jack and the deformation are measured. Based on these information deformation moduli for initial and subsequent load steps can be calculated.

In addition to the laboratory tests carried out at the University of Innsbruck at the Institute of Geotechnics at Vienna University of Technology the following tests have been performed amongst others in order to determine basic (soil) mechanical properties:

- Investigations with single glass foam grains (material density, grain density, void ratio, unconfined compression tests, frost resistivity analysis)
- Investigations with glass foam aggregates (grain size distribution, bulk density, void ratio, confined compression tests, shear tests, determination of refining after compaction and compression, hygroscopicity, water permeability)
- Dynamic load plate tests on glass foam aggregate layers in the laboratory
- Dynamic load plate tests on glass foam aggregate layers in the field

The innovative one-plate measuring equipment developed in the scope of the project enables the study of the influence of the degree of compaction, temperature, and water content on the thermal conductivity of bulk insulation. The sample can be compressed inside the device and investigated under vacuum. The direction of heat flow is from top to bottom to allow the measurement under realistic conditions (installation beneath the foundation of a building). Convection in the aggregate is thus excluded. The measurement of thermal conductivity in the one-plate apparatus is carried out in a dry state for three different bulk densities, which are achieved through compression by using the hydro pulse machine.

## Results and Conclusions

Producers of glass foam aggregate usually classify their products on the basis of the value of the bulk density. Test results gained in this research project clearly revealed, that not the bulk density but the compressive strength  $\sigma_{ck}$  of single glass foam grains is much more applicable to describe the material properties with respect to the load deformation behaviour of glass foam aggregate layers.

The level of compression represents the leading factor for stiffness and consequently for the occurrence of vertical deformations of glass foam aggregate layers. For the achievable stiffness of glass foam aggregate layers the degree of compaction is of significant relevance. More or less independently of the material type, the layer thickness and the filling procedure a better compaction achieved results in a higher stiffness of glass foam aggregate layers. Hence, using the aggregate as load bearing layers and for thermal insulation, attention has to be directed on an efficient compaction of glass foam aggregate layers.

In course of the performed research project based on various tests values for the stiffness modulus (initial loading) within the range of  $E_{s1} = 1.0 \div 6.0$  MPa could be observed, which strongly depend on the type of glass foam aggregate, the compaction and the compression and the corresponding stress level.

The values of the thermal conductivity of the glass foam granules measured with the new one-plate apparatus are in the range of 0.08 W/(m K) to 0.1 W/(m K) and thus show significant scattering. The scattering decreases with increasing degree of compression. The thermal conductivity is in the range of 0.08 W/(m K) for compacted foam glass aggregate (measured value of the thermal conductivity). The thermal conductivity of glass foam aggregate increases slightly with increasing temperature. The thermal conductivity increases approximately linearly with increasing moisture content at low temperatures, i.e. 20°C and less. With a moisture content of 20 Vol.% the thermal conductivity increased to values between 0.15 W/(m K) and 0.2 W/(m K).

The thermal conductivity of glass foam aggregate decreases slightly with increasing degree of compaction, however the thermal resistance decreases (given a constant volume of the material sample), as the thickness of the sample decreases with increasing degree of compaction. From the thermal point of view the compaction should accordingly be as low as possible. With the presented mathematical models good agreement between predicted and measured results could be obtained for dry samples and for low water contents (i.e. 10 Vol.%

and lower). For higher water contents the model suggested in Ochs f., 2010 delivers better results.

## **Prospects / Suggestions for Future Research**

The findings can be used as the basis of a future development for standardized procedures to classify glass foam aggregate. Moreover, the results encourage for further scientific investigations in the scope of an intended PhD thesis.

Glass foam aggregate layers showed material characteristics scattering in a wide range with respect to the load deformation behaviour. Thus, it is recommended to focus on an improvement of the production process in order to guarantee a more constant quality of the material.

Further studies with a focus on the use of foam glass aggregate as an insulating material for large underground heat stores will follow in the framework of the FFG project store4grid. The one-plate measuring equipment has been extended such that the direction of heat flow can be changed (by rotation of the whole apparatus). This allows studying the influence of convection on the thermal conductivity of bulk insulation. This represents an advantage in comparison to previous works [Ochs 2010], where a two-plate apparatus was used.

In the framework of the FFG, project store4grid, the influence of moisture will be further examined. Furthermore, the influence of convection on the thermal conductivity in bulks with the direction of the heat flow from bottom to top and horizontal heat flow will be investigated. For the prediction of the effective thermal conductivity of glass foam aggregate installed beneath building foundations the development of the relative humidity or equilibrium moisture content of the glass foam aggregate with time is crucial. In-situ measurements over a period of minimum 3 years in a relevant number would be necessary for this. This should be examined in future projects.

# 1 Einleitung

Der Einbau einer Wärmedämmung unter lastabtragenden Bauteilen im Zuge der Errichtung von Gebäuden gewinnt durch den erforderlichen sparsamen Umgang mit Energieressourcen und Forderungen zur Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung.

In der Vergangenheit scheiterte diese Art der Ausführung vielfach am Fehlen von geeigneten Materialien, die die notwendigen Anforderungen erfüllen können. Glasschaumgranulat präsentiert sich in diesem Zusammenhang als innovative Lösungsmöglichkeit. Es handelt sich dabei um einen Recyclingbaustoff, der aus Altglas hergestellt wird und alle Anforderungen an einen ökologischen Baustoff erfüllt. Durch seine Struktur besitzt Glasschaumgranulat alle Voraussetzungen hinsichtlich eines hohen Lastabtrag- und Wärmedämmvermögens, weshalb es sich in der Praxis bei erdberührten Bauteilen in idealer Weise als Kombinationslösung für lastabtragende und zugleich wärmedämmende Schicht anbieten würde. Aufgrund der grobkörnigen Struktur kann einer Schüttung aus diesem Material darüber hinaus eine dränierende Wirkung zugeschrieben werden. Durch die geringe Dichte von Glasschaumgranulat resultiert neben einer geringeren Belastung des Baugrundes auch eine einfache Handhabung im Zuge des Einbaus.

Viele Dämmstoffe sind mangels Druckfestigkeit bzw. Feuchtbeständigkeit nicht für den Einsatz an erdberührten Bauteilen geeignet. Die Alternative, den Dämmstoff auf der Oberseite der Bodenplatte anzuordnen, weist erhebliche bauphysikalische Nachteile auf. Es handelt sich feuchtetechnisch gesehen hierbei um eine Innendämmung mit diffusionstechnischen Nachteilen (Gefahr der Taupunktunterschreitung an der Bodenplatte). Darüber hinaus bilden aufsteigende Außen- und Trennwände potenzielle Wärmebrücken, da die innenliegende Wärmedämmung auf der Bodenplatte unterbrochen wird. Im Gegensatz dazu kann der Einbau von Glasschaumgranulat unter und neben der Bodenplatte bzw. dem Streifenfundament vollflächig und lückenlos erfolgen, womit Wärmebrücken weitgehend vermieden werden.

Grundsätzlich müssen für jedes Bauwerk Anforderungen hinsichtlich der Standsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit aber auch hinsichtlich der bauphysikalischen Anforderungen erfüllt werden. Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojektes sollten daher die aktuell noch fehlenden mechanischen Eigenschaften sowie die effektive Wärmeleitfähigkeit von lastabtragenden Glasschaumgranulatschichten wissenschaftlich untersucht werden.

Folgende Aspekte der Auflagerung von Tragwerken auf Glasschaumgranulatschichten sollen im Zuge des Forschungsprojektes geklärt werden:

- Einfluss einer Glasschaumgranulatschicht auf das Setzungsverhalten
- Einfluss einer Glasschaumgranulatschicht auf die Schnittgrößenermittlung
- Einfluss einer Glasschaumgranulatschicht auf den Grundbruchnachweis
- Einfluss einer Glasschaumgranulatschicht auf den Gleitsicherheitsnachweis

- Entwicklung eines praxisnahen Verfahrens für die Durchführung von thermischen (und hygrischen) Messungen zur Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit von Glasschaumgranulatschicht als Dämmstoff unter lastabtragenden Bauteilen

Die Ergebnisse der geplanten wissenschaftlichen Untersuchungen können für eine bauaufsichtliche Zulassung direkt herangezogen werden und die bislang vorliegende Benachteiligung dieses Baustoffs bei der Bewertung gegenüber anderen Materialien aufheben. Ein objektiver Vergleich sämtlicher am Markt erhältlichen Materialien wird dadurch erst ermöglicht.

## 2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

### 2.1 Beschreibung des Standes der Technik

Mit der Zulassung des Deutschen Institutes für Bautechnik (Zulassungsnummer Z-23.34-1526) wird die Verwendbarkeit bzw. Anwendbarkeit von Glasschaumgranulat vom Typ „TECHNOPor Perimeter 50“ der Firma Technopor Handels GmbH im Sinne der deutschen Landesbauordnungen nachgewiesen. Die wichtigsten Punkte der Zulassung können wie folgt zusammengefasst werden: Glasschaumgranulat darf als verdichtete, lastabtragende Wärmedämmung (Verdichtungsverhältnis  $v = 1,3:1$ ) mit einem maximalen Korndurchmesser  $\leq 60$  mm unter Gründungsplatten bei vorwiegend ruhender Belastung, nicht aber im Grundwasser und auch nicht im Kapillarsaum des Grundwassers (30 cm über HWL) angewendet werden. Die Schichtstärke muss zwischen 150 mm und 900 mm liegen, wobei bei verdichteten Schichtstärken von größer als 300 mm das Material in zwei bzw. drei Lagen zu schütten und zu verdichten ist. Die Lagenstärke nach Verdichtung darf eine maximale Höhe von 300 mm nicht überschreiten. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit wird mit  $\lambda = 0,12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  festgelegt. Der Nennwert der Druckfestigkeit beträgt  $f_{c,Nenn} = 560 \text{ kN/m}^2$ . Der Bemessungswert der Druckfestigkeit wird mit  $f_{cd} = 270 \text{ kN/m}^2$  festgelegt und der Steifemodul der Wärmedämmschicht kann mit  $E_s = 6 \text{ MN/m}^2$  angenommen werden. Hinsichtlich der Eigenschaften des Materials müssen folgende Anforderungen erfüllt werden. Jeder Versuch zur Ermittlung der Schüttdichte muss einen Wert von mindestens  $160 \text{ kg/m}^3$  und höchstens  $190 \text{ kg/m}^3$  ergeben. Die Wärmeleitfähigkeit darf den Grenzwert von  $\lambda_{Grenz} = 0,12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  nicht überschreiten. Versuche zur Bestimmung der aufnehmbaren Druckspannung des verdichteten Materials bei 10% Stauchung müssen (gemäß EN 826) stets einen Mindestwert  $560 \text{ kN/m}^2$  erreichen.

An der Technischen Universität Wien wurden im Jahr 2004 erste Laborversuche zur Ermittlung von mechanisch relevanten Parametern von Glasschaumgranulat vom Typ „Hasopor“ durchgeführt [Brandl 2004]. Die Untersuchungen erfolgten sowohl am Einzelkorn, als auch am Korngemisch. Die Korngröße der Einzelkörner des angelieferten Materials lag zwischen 16 und 63 mm. Am Einzelkorn wurden neben der Bestimmung der Dichte und von mechanischen Parametern wie z.B. der Druckfestigkeit auch hygrische Parameter wie z.B. die Wasseraufnahmefähigkeit und die kapillare Saugfähigkeit ermittelt. Letztere wurde auch an

feinkörnigem Material bestimmt, welches durch Kornabrieb und Kornzertrümmerungen im Rahmen der Versuche angefallen war. Umfangreiche Laboruntersuchungen wurden auch am Korngemisch durchgeführt. Dies betraf zunächst die Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Trockensiebung und die Bestimmung der Lagerungsdichte des „Rohmaterials“ im Anlieferungszustand bei loser Schüttung. Zur Beurteilung der Verdichtungsfähigkeit und der Kornzertrümmerungen durch den Einbauvorgang wurden Proctorversuche mit normierter Verdichtungsenergie durchgeführt. Das Last-Verformungsverhalten wurde durch Kompressionsversuche mit einer maximalen Belastung von  $800 \text{ kN/m}^2$  ermittelt. Sowohl bei den Proctorversuchen als auch bei den Kompressionsversuchen kam es zu Kornabrieben zwischen den Einzelkörnern und zu Kornzertrümmerungen, welche sich durch Siebungen des Materials unmittelbar nach dem Versuch bestimmen ließen. Zur Ermittlung des Schüttwinkels von Glasschaumgranulat wurden Schüttkegelversuche durchgeführt. Ergänzend wurde der Reibungswinkel anhand von Rahmenscherversuchen mit gebrochenem Glasschaumgranulat bestimmt. Zur Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls wurde Glasschaumgranulat in einen Versuchsrahmen eingebaut und mit dem Leichten Fallgewichtsgerät geprüft. Die Versuche wurden sowohl auf der Glasschaumgranulatschicht als auch auf einer lastverteilenden Deckschicht als „Sandwichkonstruktion“ durchgeführt.

Eine umfangreiche Übersicht über die Messung und Modellierung der Wärmeleitfähigkeit ist im VDI Wärmeatlas zu finden. Weiterentwicklungen zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen wurden in [Ochs F 2010] beschrieben. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur lässt sich für trockene Dämmstoffe hinreichend genau mit einem linearen Zusammenhang beschreiben.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit steigt mit der Temperatur und der Stofffeuchte, wobei der Einfluss der Stofffeuchte abhängig vom Porenanteil und von der Porenstruktur des Dämmstoffes ist. Die effektive Wärmeleitfähigkeit eines feuchten porösen Körpers verhält sich annähernd wie die eines Körpers mit einer seriellen und parallelen Aneinanderschaltung von Feststoff und Hohlraum, bestehend aus Wasser, gesättigter Luft und trockener Luft. Zusätzlich beinhaltet die effektive Wärmeleitfähigkeit noch einen temperaturabhängigen Strahlungsanteil. Als Stoffgrößen gehen in das Modell die Dichte, die Porosität sowie die freie Wassersättigung ein. Diese Größen hängen jedoch vom Verdichtungsgrad ab und müssen daher messtechnisch für jede Verdichtungsstufe bestimmt werden. Eine ausführliche Beschreibung des Berechnungsmodells findet sich in [Ochs F 2010].

Hinsichtlich des Einflusses der Verdichtung von Glasschaumgranulatschüttungen auf die effektive Wärmeleitfähigkeit wird in [Ochs F 2010] gefolgert, dass dieser im trockenen Zustand relativ gering ausfällt. In den Versuchen war keine eindeutige Tendenz des Einflusses der Verdichtung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit zu erkennen. Andererseits wird der Einfluss der Feuchtigkeit durch die Verdichtung reduziert, wobei aber die Feuchtigkeit aus einer verdichteten Glasschaumgranulatschüttung langsamer entweicht als aus einer unverdichteten. Die Versuche wurden am ITW (Universität Stuttgart) mit einem symmetrischen Plattengerät durchgeführt, die Richtungsabhängigkeit des Konvektionseinflusses konnte damit nicht bestimmt werden. Beim Einsatz von Glasschaumgranulat unter lastabtragenden Bauteilen ist die Wärmestromrichtung von oben nach unten vorgegeben. In den nachfolgenden Abschnitten

wird daher die Entwicklung eines speziellen Ein-Plattengerätes vorgeschlagen wie es an der Universität Innsbruck erstellt wurde.

## **2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema**

2007 begann die Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Massivbau und Brückenbau, damit, eine Versuchsanordnung zu entwickeln, mit der es möglich sein soll, das Last-Verformungsverhalten von Glasschaumgranulatschichten unter unterschiedlichen Fundamentgrößen großmaßstäblich zu simulieren und mit der es gelingen soll, Fragestellungen im Bereich der Lastabtragung zu klären. 2008 konnte die Versuchsanordnung fertig gestellt werden (s. Abschnitt 3.4).

Bezogen auf die Entwicklung der praxisnahen Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen aus Glasschaumgranulat im Fundament-/Bodenplattenbereich lag seitens der Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Bauphysik, bereits vor Beginn des Forschungsvorhabens ein Vorschlag vor, der über die derzeitige Praxis der Messung in der „konventionellen Plattenapparatur“ hinaus geht und apparativ eine Neuentwicklung darstellt. Die technische Eignung der neuen Messapparatur soll im Zuge des vorliegenden Projektes nachgewiesen und weiterentwickelt werden.

## **2.3 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts)**

Die generelle Neuheit bei der Anwendung von Glasschaumgranulat besteht darin, dass mit diesem Recyclingbaustoff nun auch ein granulares Medium zur Verfügung steht, das durch seine Eigenschaften alle Voraussetzungen erfüllt, um im Gründungsbereich die Übertragung von Lasten in Kombination mit einem guten Wärmedämmvermögen und einer drainierenden Wirkung ermöglichen zu können. In der Praxis werden in jüngerer Zeit zur Dämmung im Gründungsbereich auch Platten aus extrudiertem Polystyrolhartschaum oder geschäumten Glas zum Einsatz gebracht, wobei Glasschaumgranulat gegenüber diesen „Plattenprodukten“ nennenswerte Vorteile bietet. Während bei Platten die Anforderungen an einen ebenen Untergrund sehr hoch sind, das spröde Materialverhalten führt bei einer ungleichmäßigen Lagerung leicht zum Bruch, kann das Glasschaumgranulat mit einem Gewicht von  $150 \text{ kg/m}^3$  bis  $210 \text{ kg/m}^3$  schnell und ohne Einsatz großer Baumaschinen einfach an jeden Untergrundverlauf angepasst werden. Somit resultiert aus der Anwendung von Glasschaumgranulat der Vorteil, eine in sich abgeschlossene „Gründungslösung“ bei erdberührten Bauteilen anbieten zu können.

Die Neuheit, bezogen auf die durchzuführenden wissenschaftlichen, bauphysikalischen Untersuchungen besteht in der Entwicklung einer praxisnahen Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Glasschaumgranulatschüttungen im Fundament-/Bodenplattenbereich. Bislang existiert kein normatives Verfahren, welches die baupraktischen Zustände und Randbedingungen hinreichend genau abbilden kann. Die normierten Messungen im „Plattengerät“ sind dazu nicht geeignet. Einerseits sind für Schüttungen mit großem Korndurchmesser hohe Schüttlagen erforderlich, andererseits würden bei den Standardverfahren zu hohe Randverluste auftreten. Symmetrisch aufgebaute



Zweiplattengeräte sind aufgrund der Wärmestromrichtung nach oben und unten nicht geeignet, wenn dabei die Konvektion im Material nicht vernachlässigbar ist.

## **2.4 Verwendete Methoden**

Für die wissenschaftliche Untersuchung von Glasschaumgranulat wurde in erster Linie der experimentelle Ansatz gewählt, wobei in Ergänzung auch theoretische Überlegungen angestellt wurden. Zur Ermittlung der bodenmechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften wurden an der Universität Innsbruck und an der Technischen Universität Wien folgende experimentellen Untersuchungen durchgeführt:

- Ermittlung der Dichten am Einzelkorn und am Korngemisch
- Durchführung von einaxialen Druckversuchen am Einzelkorn
- Ermittlung der Korngrößenverteilung des Ausgangsmaterials und des getesteten Materials
- Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens anhand von großmaßstäblichen Versuchen
- Großkompressionsversuche zur Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens
- Proctorversuche zur Überprüfung der Verdichtungseigenschaften
- Großrahmenscher- und Triaxialversuche zur Untersuchung der Scherparameter
- Ermittlung der Wasseraufnahmefähigkeit des Korngemischs
- Untersuchungen zur Ermittlung der Drainageeigenschaften
- Frostversuche mit wassergesättigten Proben
- Dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz im Labor
- Ergänzend wurden von der Firma Technopor Handels GmbH ebenfalls dynamische Lastplattenversuche bei eingebauten Glasschaumgranulatschichten im Zuge diverser Bauvorhaben durchgeführt.
- Messung der Wärmeleitfähigkeit in einer Ein-Platten-Apparatur in Abhängigkeit von Verdichtungsgrad und Temperatur
- Modellierung der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Verdichtungsgrad, Feuchtegehalt und Temperatur

## **2.5 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten mit Quellenangabe, Erläuterung der Erhebung**

Für die experimentellen Untersuchungen wurden die an der TU Wien und an der Universität Innsbruck ansässigen Laboreinrichtungen genutzt, an der TU Wien das Erdbaulabor am

Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, und an der Universität Innsbruck die Technische Versuchs- und Forschungsanstalt (TVFA).

Nach erfolgter Abstimmung der Arbeiten wurden die unterschiedlichen Untersuchungen getrennt voneinander durchgeführt, die Zwischenergebnisse laufend abgestimmt, die Erkenntnisse ausgetauscht und schlussendlich zusammengeführt.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens mussten einige Versuche an die TU Bergakademie Freiberg ausgelagert werden, da zu diesem Zeitpunkt die entsprechende erforderliche Versuchseinrichtung an der TU Wien noch nicht vorhanden war.

Seitens des Industriepartners Technopor Handels GmbH wurden Versuche im Feld im Zuge der Abwicklung von Bauprojekten durchgeführt, die als Ergänzung zu den Versuchen unter Laborbedingungen dienten.

Sämtliche Untersuchungsergebnisse und Erkenntnisse aus den Forschungstätigkeiten werden im gegenständlichen Forschungsbericht zusammengefasst.

## 3 Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen

### 3.1 Grundlagen

Im Hinblick auf einen jeweils optimierten Einsatz von Glasschaumgranulat in unterschiedlichen Anwendungsszenarien des Bauwesens (Straßenbau, Hochbau etc.) stellt die Firma Technopor Handels GmbH verschiedene Glasschaumgranulattypen her, wobei folgende Materialien im Zuge des Forschungsvorhabens untersucht wurden. Dazu sei angemerkt, dass die Materialien, die im Jahr 2013 angeliefert wurden, nur für die Untersuchungen mit dynamischen Lastplattenversuchen verwendet wurden.

*Tabelle 3-1: Untersuchte Materialtypen*

| Produktbezeichnung Fa. Technopor Handels GmbH | Schüttdichte gemäß ÖN EN 1097-3 [kg/m <sup>3</sup> ] | Lieferdatum | Bezeichnung innerhalb des Forschungsvorhabens |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------|
| Füll 100                                      | ~150                                                 | 02.2011     | G150 (2011)                                   |
| Füll 100                                      | ~150                                                 | 12.2013     | G150 (2013)                                   |
| Perimeter 50                                  | ~170                                                 | 08.2010     | G170 (2010)                                   |
| Perimeter 50                                  | ~170                                                 | 10.2012     | G170 (2012)                                   |
| Druck 50                                      | ~210                                                 | 08.2011     | G210 (2011)                                   |
| Druck 50                                      | ~210                                                 | 12.2013     | G210 (2013)                                   |

In allen nachfolgenden Kapiteln wird der Begriff Glasschaumgranulat mit „GSG“ abgekürzt.

Die Anlieferung des Materials an die Universitäten erfolgte in Säcken, sogenannte „Big Bags“, mit einer Größe von ca. 1,5 m<sup>3</sup>, die witterungsgeschützt gelagert wurden.

Wie bereits in Abschnitt 2.1 dargelegt, schreibt die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) folgende Regelungen für die Anwendung von Glasschaumgranulat als lastübertragendes und wärmedämmendes Schüttmaterial unter Bodenplatten vor (Auszug):

- Einbau im verdichteten Zustand (Verdichtungsverhältnis  $v = 1,3:1$ )
- Schichthöhe SH der verdichteten Glasschaumgranulatschicht  $150 \text{ mm} \leq SH \leq 900 \text{ mm}$

Abweichend von der festgelegten Regelung für die Verdichtung wurden die Untersuchungen der Materialtypen (siehe Tabelle 3-1) für verschiedene Verdichtungen C durchgeführt. Allgemein bedeutet eine Verdichtung C, dass eine geschüttete Höhe H um C dieser Höhe auf eine Schichthöhe SH verdichtet wird.

$$SH = H - C \cdot H \quad \text{bzw.} \quad C = \left(1 - \frac{SH}{H}\right) \cdot 100 \text{ in } \% \quad (3-1)$$

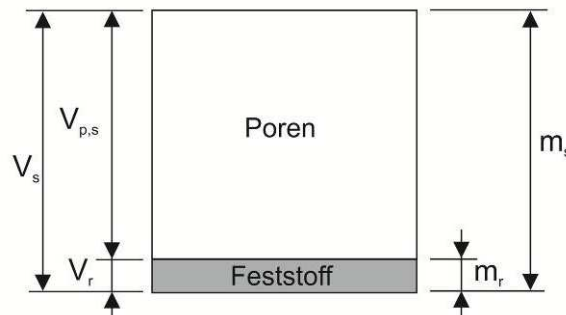
Neben der Verdichtung C wurden auch verschiedene Schichthöhen SH untersucht.

### 3.2 Laboruntersuchungen am Einzelkorn

Es wurden folgende Untersuchungen am Einzelkorn durchgeführt:

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

#### 3.2.1 Ermittlung der Reindichte $\rho_r$



|           |                                |       |                       |
|-----------|--------------------------------|-------|-----------------------|
| $V_r$     | Volumen des Feststoffes (Glas) | $m_r$ | Masse des Feststoffes |
| $V_s$     | Volumen des Einzelkorns        | $m_s$ | Masse des Einzelkorns |
| $V_{p,s}$ | Volumen der Poren              |       |                       |

Abbildung 3-1: Vereinfachende Darstellung der Bestandteile des Einzelkorns

Die Reindichte  $\rho_r$  ist die Dichte des porenbildenden Feststoffes (Glas) im Einzelkorn und berechnet sich aus dem Quotient der Masse des Feststoffes  $m_r$  und dem Volumen des Feststoffes  $V_r$ . Die Masse der Poren wird zu Null angenommen, somit entspricht die Masse des Feststoffes der Masse des Einzelkorns ( $m_r = m_s$ ).

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_r} = \frac{m_s}{V_r} \quad (3-2)$$

##### 3.2.1.1 Versuchsdurchführung

Für die Bestimmung der Reindichte  $\rho_r$  wurde das Glasschaumgranulat zu Pulver mit einem Korndurchmesser  $< 0,063 \text{ mm}$  gemahlen. Anhand dieses Pulvers wurde mit dem Kapillarpyknometer gemäß ÖNORM B 4413 die Reindichte  $\rho_r$  je Materialtyp jeweils anhand einer Probe bestimmt.

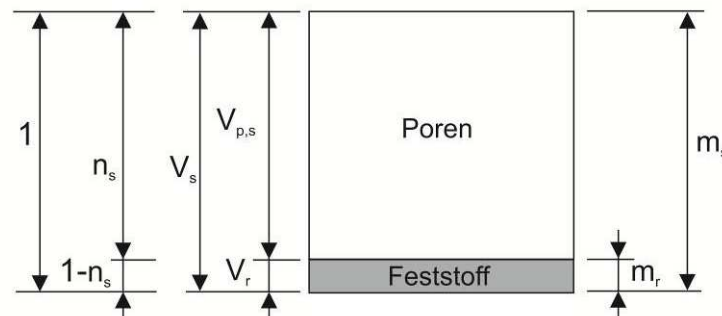
### 3.2.1.2 Ergebnisse und Auswertung

Tabelle 3-2: Reindichte  $\rho_r$  in Abhängigkeit vom Materialtyp

| Materialtyp                              | G150 (2011) | G170 (2012) | G170 (2010) | G210 (2011) |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Reindichte $\rho_r$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 2,528       | 2,503       | 2,494       | 2,479       |

Wie erwartet liegen die ermittelten Reindichten  $\rho_r$  in der Größenordnung der Dichte von Glas ( $\rho_{\text{Glas}} \sim 2,5 \text{ g/cm}^3$ ).

### 3.2.2 Ermittlung der Rohdichte $\rho_s$ und des zugehörigen Porenanteils $n_s$



|           |                                |       |                       |
|-----------|--------------------------------|-------|-----------------------|
| $V_r$     | Volumen des Feststoffes (Glas) | $n_s$ | Porenanteil           |
| $V_s$     | Volumen des Einzelkorns        | $m_r$ | Masse des Feststoffes |
| $V_{p,s}$ | Volumen der Poren              | $m_s$ | Masse des Einzelkorns |

Abbildung 3-2: Vereinfachende Darstellung der Bestandteile des Einzelkorns

Die Rohdichte  $\rho_s$  ist die Dichte des Einzelkorns (Korndichte) unter Berücksichtigung der im Einzelkorn vorhandenen Poren. Die Rohdichte  $\rho_s$  wird aus dem Quotienten der Masse des Einzelkorns und des zugehörigen Volumens des Einzelkorns  $V_s$  berechnet, welches sich aus den beiden Volumina des Feststoffes  $V_r$  und der Poren  $V_{p,s}$  zusammensetzt.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_{p,s} + V_r} = \frac{m_s}{V_s} \quad (3-3)$$

Der Porenanteil  $n_s$  im Einzelkorn leitet sich aus dem Verhältnis des Porenvolumens  $V_{p,s}$  und dem gesamten Volumen des Einzelkorns  $V_s$  ab und kann auf Basis der Reindichte  $\rho_r$  und der Rohdichte  $\rho_s$  berechnet werden.

$$n_s = \frac{V_{p,s}}{V_s} = \frac{V_s - V_r}{V_s} = 1 - \frac{V_r}{V_s} = 1 - \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_s}{\rho_s}} = 1 - \frac{\rho_r}{\rho_s} = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_r} \quad (3-4)$$

#### 3.2.2.1 Versuchsdurchführung

Die Bestimmung der Rohdichte  $\rho_s$  erfolgte anhand der Masse und des Volumens von sauberen und trockenen Glasschaumprismen. Bei der Herstellung der Prismen wurden die Einzelkörner in einer entsprechenden Vorrichtung eingespannt und geschliffen, wobei

besonders auf die Planparallelität aller Seitenflächen geachtet wurde. Die Prismen wurden mit einer quadratischen Grundfläche hergestellt.



Abbildung 3-3: Vorrichtung zur Herstellung von Glasschaumprismen

Das Volumen der hergestellten Prismen wurde auf Basis aller 12 Seitenlängen bestimmt. Die Bestimmung der Masse erfolgte nach dem Waschen und Trocknen der Prismen. Das Waschen ist notwendig, da sich beim Schleifen Staub in der rauen Oberfläche der Prismen einlagert und somit die Masse  $m_s$  verfälschen würde.

### 3.2.2.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Rohdichte  $\rho_s$  und der zugehörige Porenanteil  $n_s$  wurden je Materialtyp an 10 Prismen bestimmt.

Tabelle 3-3: Rohdichte  $\rho_s$  und Porenanteil  $n_s$  in Abhängigkeit vom Materialtyp

|                    | Rohdichte $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ] |             |             |             |
|--------------------|-----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Materialtyp        | G150 (2011)                             | G170 (2012) | G170 (2010) | G210 (2011) |
| Mittelwert         | 0,250                                   | 0,259       | 0,282       | 0,277       |
| Minimum            | 0,202                                   | 0,214       | 0,268       | 0,260       |
| Maximum            | 0,296                                   | 0,291       | 0,300       | 0,291       |
| Standardabweichung | 0,029                                   | 0,027       | 0,010       | 0,011       |
|                    | Porenanteil $n_s$ [-]                   |             |             |             |
| Mittelwert         | 0,901                                   | 0,897       | 0,887       | 0,888       |
| Minimum            | 0,883                                   | 0,884       | 0,880       | 0,883       |
| Maximum            | 0,920                                   | 0,914       | 0,893       | 0,895       |
| Standardabweichung | 0,011                                   | 0,011       | 0,004       | 0,004       |

### 3.2.3 Einaxialer Druckversuch

Die einaxialen Druckversuche dienen zur Ermittlung des Spannungs-Stauchungsverhaltens des Einzelkorns.

Die einaxiale Druckspannung ist definiert als Quotient der aufgebrachten Druckkraft und der Querschnittsfläche des aus einem Einzelkorn hergestellten Versuchsprismas. Die Querschnittsfläche wurde anhand der jeweils vorliegenden Abmessungen ermittelt. Für die Versuchsauswertung wurde die Querschnittsfläche als jeweils konstant über den Versuchszeitraum angenommen, was durch Messungen im Zuge diverser Versuche bestätigt wurde. Die einaxiale Stauchung ist definiert als Quotient von der sich bei einer Last jeweils einstellenden Höhendifferenz zur Prismenhöhe bei Versuchsbeginn.

Alle einaxialen Druckversuche wurden an geschliffenen Prismen mit einer quadratischen Grundfläche durchgeführt, wobei auf die Planparallelität sämtlicher Oberflächen besonders geachtet wurde. Die Höhe der Prismen betrug in etwa das 2-fache der Grundlänge.



Abbildung 3-4: Elektromechanische Presse zur Durchführung der einaxialen Druckversuche

#### 3.2.3.1 Auswertung und Ergebnisse

Abbildung 3-5 zeigt exemplarisch das Spannungs-Stauchungsverhalten eines Glasschaumprismas. Der sich ergebende Spannungs-Stauchungs-Verlauf ist charakteristisch für das Materialverhalten von Glasschaumprismen und konnte bei allen durchgeführten Druckversuchen beobachtet werden.

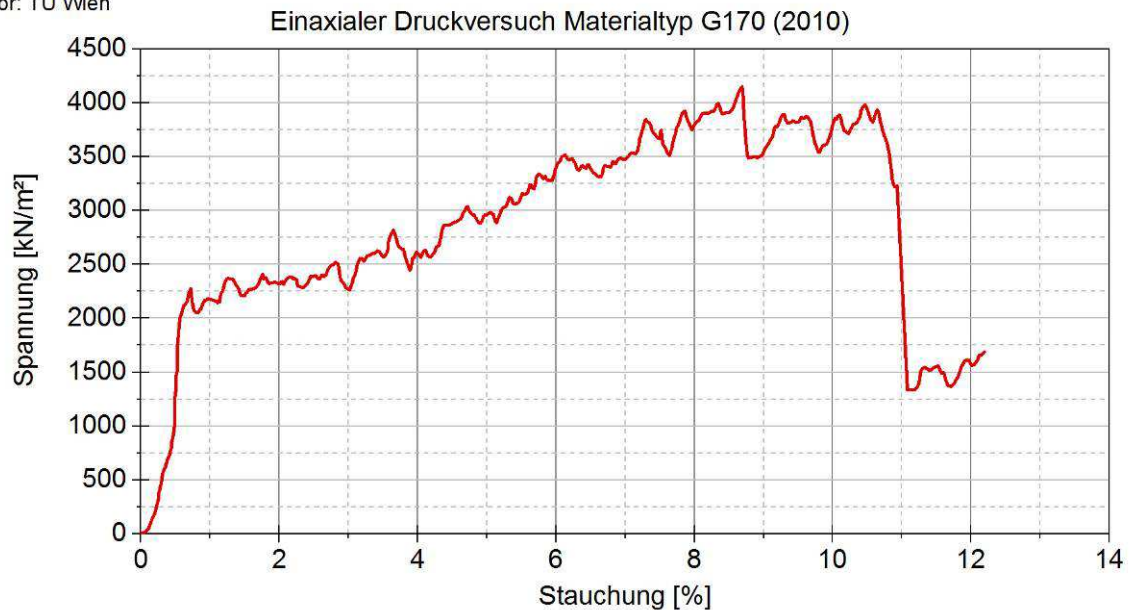
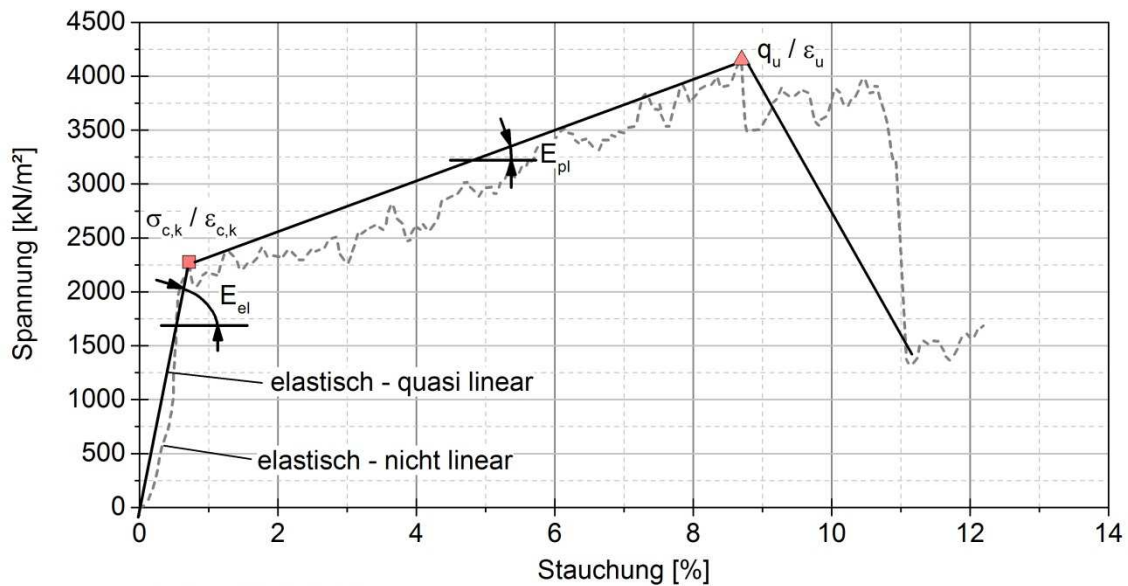


Abbildung 3-5: Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen im Zuge des einaxialen Druckversuches (exemplarisch)

Die Arbeitslinie weist zu Beginn einen quasi-linearen Anstieg auf. Ab einem bestimmten Wert der Spannung kommt es plötzlich zu einem signifikanten Abfall der Steifigkeit. Der weitere Verlauf ist folglich durch ein duktilen Verhalten und einen geringen Anstieg der Normalspannung im Prisma bis zum Erreichen der Bruchfestigkeit gekennzeichnet. Der Verlauf legt den Schluss nahe, dass für die Praxis der zulässige Wert der Kontaktspannungen zwischen den Einzelkörnern im Korngemisch so beschränkt werden sollte, dass die zum Steifigkeitsabfall zugehörige Spannung nicht überschritten wird. Diese wird folglich als einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  bezeichnet. Die maximale auftretende Spannung während des Versuchs wird als einaxiale Bruchfestigkeit  $q_u$  definiert (s. Abbildung 3-6).





- $\sigma_{c,k}$  einaxiale Druckfestigkeit
- $\varepsilon_{c,k}$  Stauchung - einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$
- $E_{el}$  mittlerer Anstieg der Arbeitslinie für Spannungen  $\sigma \leq \sigma_{c,k}$
- $q_u$  Bruchfestigkeit (maximale Spannung der Arbeitslinie)
- $\varepsilon_u$  Stauchung - Bruchfestigkeit  $q_u$
- $E_{pl}$  mittlerer Anstieg der Arbeitslinie für Spannungen  $\sigma_{c,k} \leq \sigma \leq q_u$

Abbildung 3-6: charakteristisches Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen im Zuge des einaxialen Druckversuches (exemplarisch)

Abbildung 3-7 zeigt den Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit von der Stauchung (blaue Linie). Der E-Modul als Sekante wird jeweils aus der Differenz der Stauchung und der Spannung zweier benachbarter Punkte der Arbeitslinie abgeleitet. Zu Beginn des Versuchs steigt der E-Modul mit zunehmender Stauchung an und erreicht im Bereich der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  ein Maximum. Danach fällt der E-Modul deutlich ab und ist für Spannungen von  $\sigma > \sigma_{c,k}$  nahezu konstant.

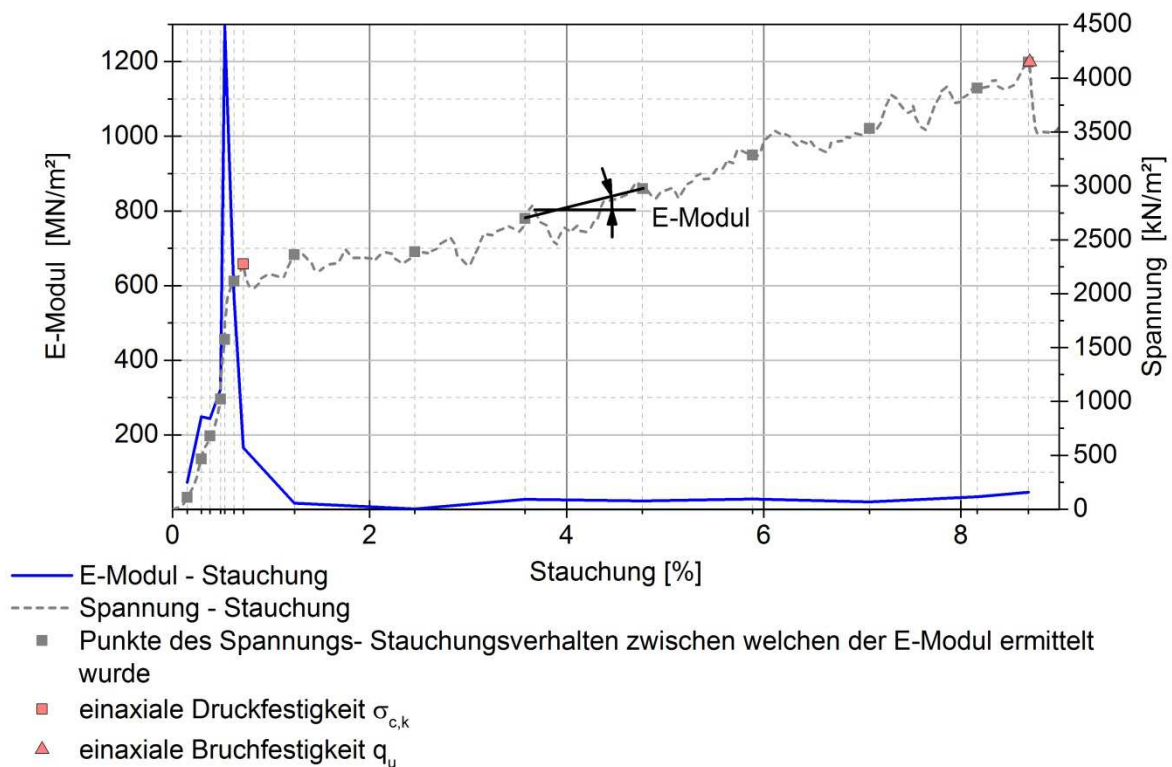


Abbildung 3-7: Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit von der Stauchung im Zuge eines einaxialen Druckversuchs (exemplarisch)

Abbildung 3-8, Abbildung 3-10, Abbildung 3-12 und Abbildung 3-14 zeigen die ermittelten Arbeitslinien der untersuchten Glasschaumprismen je Materialtyp, wobei je Materialtyp 10 Einzelversuche durchgeführt wurden.

Ergänzend wurde für jedes Prisma die Rohdichte  $\rho_s$  und der zugehörige Porenanteil  $n_s$  ermittelt.

In Tabelle 3-4, Tabelle 3-5, Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7 sind unter anderem die Rohdichten  $\rho_s$ , die zugehörigen Porenanteile  $n_s$ , die einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  und die Bruchfestigkeiten  $q_u$  je Materialtyp zusammengefasst.

Abbildung 3-9, Abbildung 3-11, Abbildung 3-13 und Abbildung 3-15 zeigen exemplarisch Prismen vor und nach dem einaxialen Druckversuch.

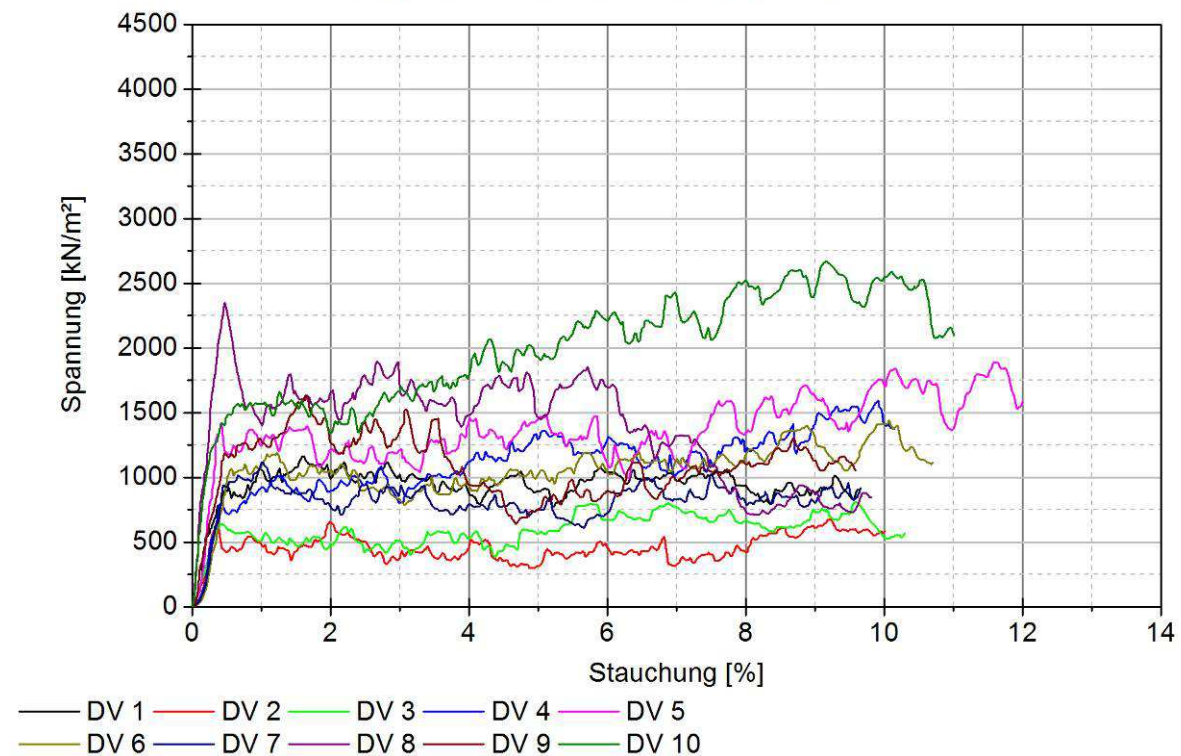


Abbildung 3-8: Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen des Materialtyps G150 (2011)

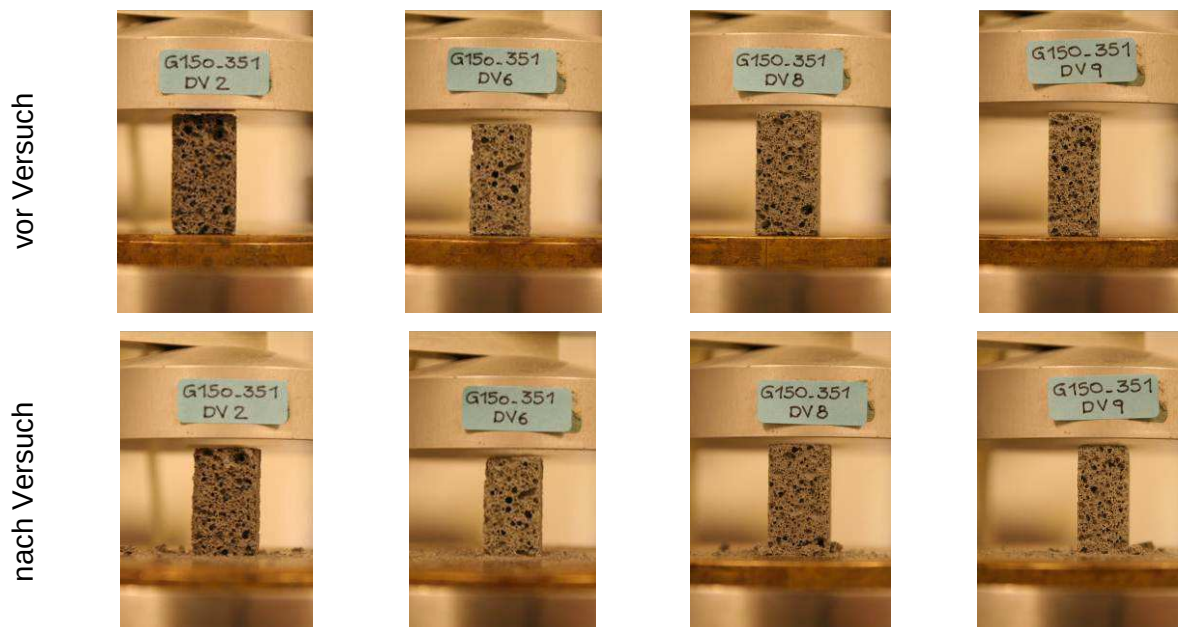


Abbildung 3-9: Prismen vor und nach dem einaxialen Druckversuch, Materialtyp G150 (2011) (exemplarisch)

Tabelle 3-4: Kennwerte der untersuchten Glasschaumprismen des Materialtyps G150 (2011)

| Eigenschaften Prisma |                             |                                  | Festigkeiten Prisma |                                        |                         |                                  |                               |                     |                                  |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------|
|                      |                             |                                  |                     | Druckfestigkeit $\sigma_{c,k}$         |                         |                                  | Bruchfestigkeit $q_u$         |                     |                                  |
|                      |                             | $\rho_s$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | $n_s$<br>[-]        | $\sigma_{c,k}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\epsilon_{c,k}$<br>[%] | $E_{el}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $q_u$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\epsilon_u$<br>[%] | $E_{pl}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] |
| G 150 (2011)         | DV 1                        | 0,254                            | 0,900               | 917,8                                  | 0,53                    | 172,8                            | 1164,3                        | 1,6                 | 23,0                             |
|                      | DV 2                        | 0,258                            | 0,898               | 646,2                                  | 0,37                    | 174,2                            | 677,5                         | 9,2                 | 0,4                              |
|                      | DV 3                        | 0,202                            | 0,920               | 639,5                                  | 0,42                    | 153,8                            | 811,2                         | 9,6                 | 1,9                              |
|                      | DV 4                        | 0,255                            | 0,899               | 814,7                                  | 0,42                    | 192,7                            | 1593,4                        | 9,9                 | 8,2                              |
|                      | DV 5                        | 0,246                            | 0,903               | 1420,5                                 | 0,42                    | 335,2                            | 1890,1                        | 11,6                | 4,2                              |
|                      | DV 6                        | 0,230                            | 0,909               | 1066,1                                 | 0,56                    | 189,2                            | 1440,0                        | 10,1                | 3,9                              |
|                      | DV 7                        | 0,211                            | 0,917               | 1015,6                                 | 0,67                    | 150,8                            | 1117,9                        | 1,0                 | 29,3                             |
|                      | DV 8                        | 0,296                            | 0,883               | 2348,4                                 | 0,48                    | 490,3                            | 2348,4                        | 0,5                 | -                                |
|                      | DV 9                        | 0,291                            | 0,885               | 1185,5                                 | 0,47                    | 253,6                            | 1630,2                        | 1,6                 | 38,1                             |
|                      | DV 10                       | 0,260                            | 0,897               | 1569,4                                 | 0,65                    | 242,6                            | 2666,5                        | 9,2                 | 12,9                             |
|                      | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,250</b>                     | <b>0,901</b>        | <b>1162,4</b>                          | <b>0,50</b>             | <b>235,5</b>                     | <b>1534,0</b>                 | <b>6,4</b>          | <b>13,5</b>                      |
|                      | Minimum                     | 0,202                            | 0,883               | 639,5                                  | 0,37                    | 150,8                            | 677,5                         | 0,5                 | 0,4                              |
|                      | Maximum                     | 0,296                            | 0,920               | 2348,4                                 | 0,67                    | 490,3                            | 2666,5                        | 11,6                | 38,1                             |
|                      | STABW <sup>2)</sup>         | 0,029                            | 0,011               | 488,97                                 | 0,10                    | 100,4                            | 604,99                        | 4,34                | 12,75                            |
|                      | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>11,4</b>                      | <b>1,3</b>          | <b>42,1</b>                            | <b>19,4</b>             | <b>42,6</b>                      | <b>39,4</b>                   | <b>67,5</b>         | <b>94,1</b>                      |

<sup>1)</sup> arithmetischer Mittelwert

<sup>2)</sup> Standardabweichung basierend auf der Glockenkurve nach Gauß

<sup>3)</sup> Variationskoeffizient = Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert in %

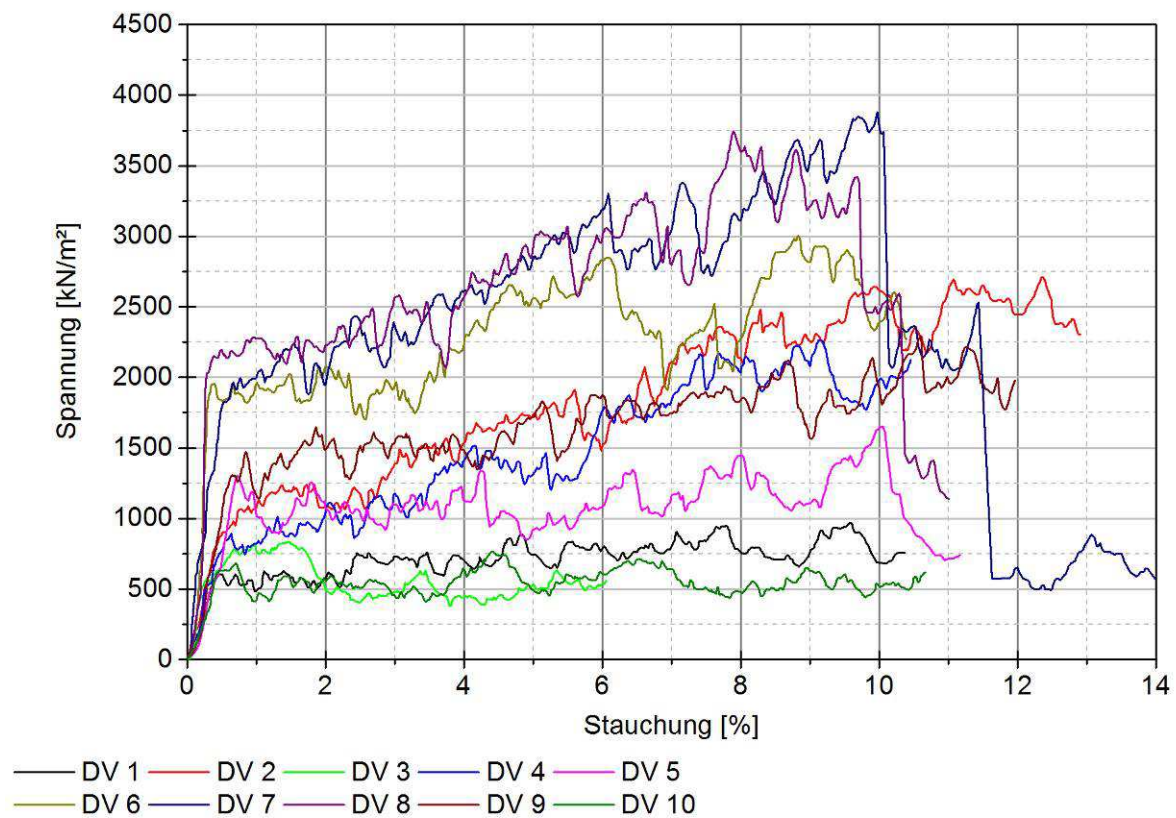


Abbildung 3-10: Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen des Materialtyps G170 (2012)

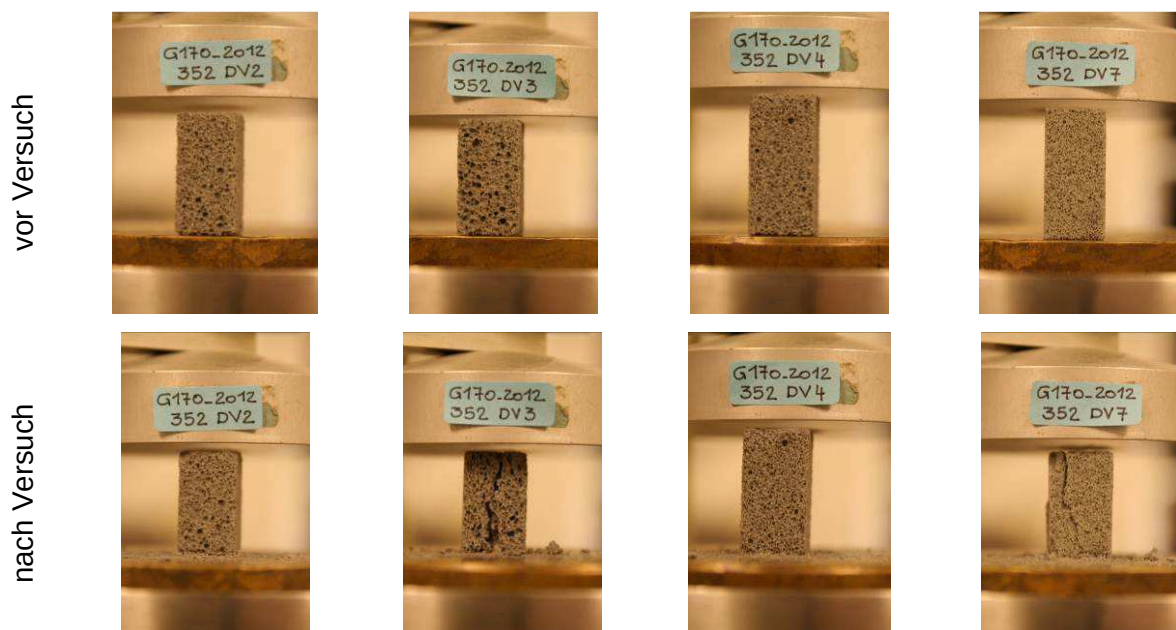


Abbildung 3-11: Prismen vor und nach dem einaxialen Druckversuch, Materialtyp G170 (2012) (exemplarisch)



Tabelle 3-5: Kennwerte der untersuchten Glasschaumprismen des Materialtyps G170 (2012)

| <u>Eigenschaften Prisma</u> |                             |                     |              | <u>Festigkeiten Prisma</u>     |                         |                     |                       |                     |                     |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
|                             |                             |                     |              | Druckfestigkeit $\sigma_{c,k}$ |                         |                     | Bruchfestigkeit $q_u$ |                     |                     |
|                             |                             | $\rho_s$<br>[g/cm³] | $n_s$<br>[-] | $\sigma_{c,k}$<br>[kN/m²]      | $\epsilon_{c,k}$<br>[%] | $E_{el}$<br>[MN/m²] | $q_u$<br>[kN/m²]      | $\epsilon_u$<br>[%] | $E_{pl}$<br>[MN/m²] |
| G 170 (2012)                | DV 1                        | 0,218               | 0,913        | 615,6                          | 0,44                    | 138,3               | 968,7                 | 9,6                 | 3,9                 |
|                             | DV 2                        | 0,267               | 0,893        | 1065,5                         | 0,79                    | 135,4               | 2709,7                | 12,4                | 14,2                |
|                             | DV 3                        | 0,228               | 0,909        | 781,8                          | 0,67                    | 116,3               | 837,3                 | 1,5                 | 6,9                 |
|                             | DV 4                        | 0,271               | 0,892        | 892,6                          | 0,64                    | 140,2               | 2263,0                | 9,1                 | 16,1                |
|                             | DV 5                        | 0,276               | 0,890        | 1300,5                         | 0,74                    | 175,3               | 1651,3                | 10,1                | 3,8                 |
|                             | DV 6                        | 0,278               | 0,889        | 1957,1                         | 0,40                    | 493,4               | 3003,0                | 8,8                 | 12,4                |
|                             | DV 7                        | 0,282               | 0,887        | 1967,1                         | 0,67                    | 295,8               | 3879,3                | 10,0                | 20,5                |
|                             | DV 8                        | 0,291               | 0,884        | 2153,6                         | 0,38                    | 568,7               | 3741,5                | 7,9                 | 21,1                |
|                             | DV 9                        | 0,267               | 0,893        | 1308,9                         | 0,66                    | 198,6               | 2293,0                | 10,6                | 9,9                 |
|                             | DV 10                       | 0,214               | 0,914        | 631,0                          | 0,49                    | 130,0               | 761,4                 | 4,4                 | 3,3                 |
|                             | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,259</b>        | <b>0,897</b> | <b>1267,3</b>                  | <b>0,59</b>             | <b>239,2</b>        | <b>2210,8</b>         | <b>8,4</b>          | <b>11,2</b>         |
|                             | Minimum                     | 0,214               | 0,884        | 615,6                          | 0,38                    | 116,3               | 761,4                 | 1,5                 | 3,3                 |
|                             | Maximum                     | 0,291               | 0,914        | 2153,6                         | 0,79                    | 568,7               | 3879,3                | 12,4                | 21,1                |
|                             | STABW <sup>2)</sup>         | 0,027               | 0,011        | 547,76                         | 0,14                    | 154,9               | 1088,85               | 3,03                | 6,4                 |
|                             | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>10,3</b>         | <b>1,2</b>   | <b>43,2</b>                    | <b>23,8</b>             | <b>64,8</b>         | <b>49,3</b>           | <b>35,9</b>         | <b>57,3</b>         |

<sup>1)</sup> arithmetischer Mittelwert

<sup>2)</sup> Standardabweichung basierend auf der Glockenkurve nach Gauß

<sup>3)</sup> Variationskoeffizient = Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert in %

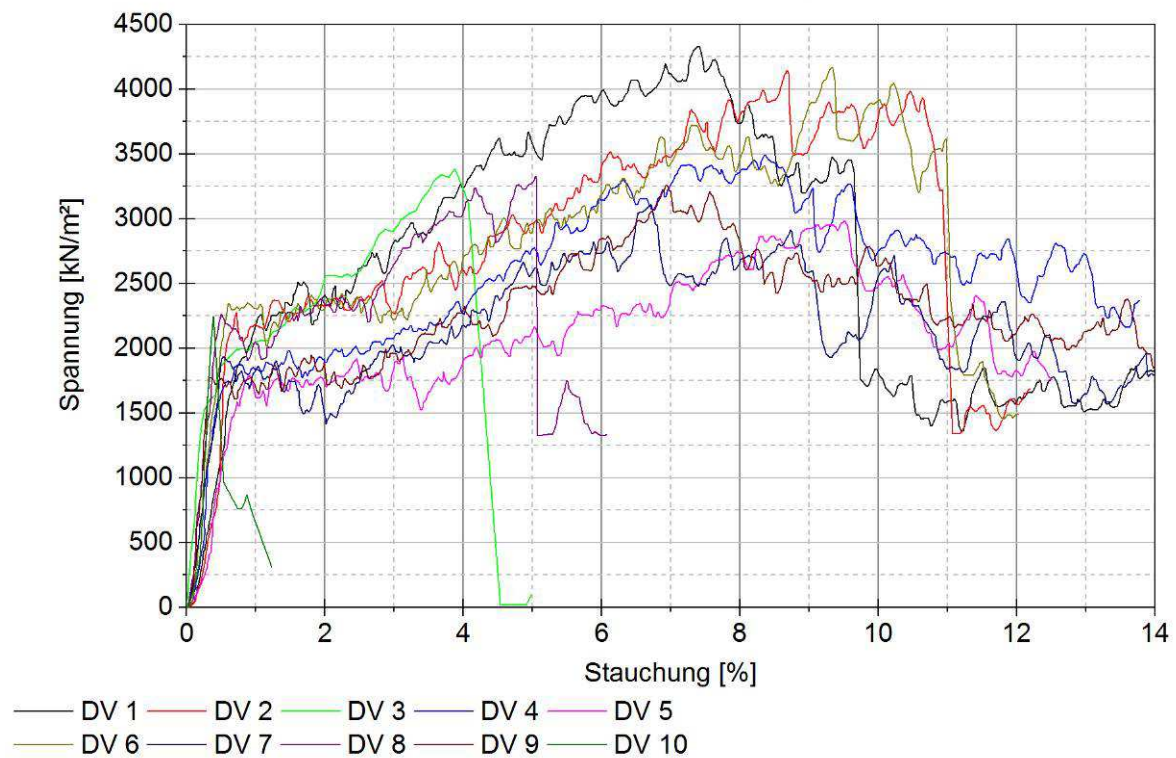


Abbildung 3-12: Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen des Materialtyps G170 (2010)

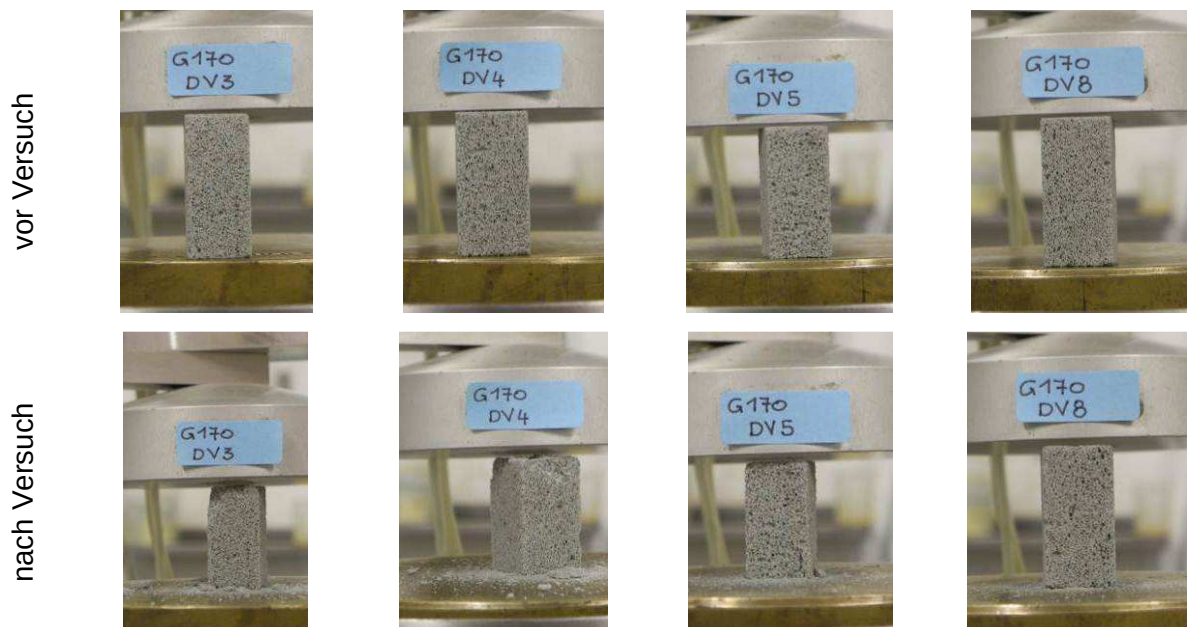


Abbildung 3-13: Prismen vor und nach dem einaxialen Druckversuch, Materialtyp G170 (2010) (exemplarisch)

Tabelle 3-6: Kennwerte der untersuchten Glasschaumprismen des Materialtyps G170 (2010)

| <u>Eigenschaften Prisma</u> |                      |       |       | <u>Festigkeiten Prisma</u>     |              |                           |                            |                     |                  |                        |                     |
|-----------------------------|----------------------|-------|-------|--------------------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|------------------------|---------------------|
|                             |                      |       |       | Druckfestigkeit $\sigma_{c,k}$ |              |                           | Bruchfestigkeit $q_u$      |                     |                  |                        |                     |
|                             |                      |       |       | $\rho_s$<br>[g/cm³]            | $n_s$<br>[-] | $\sigma_{c,k}$<br>[kN/m²] | $\varepsilon_{c,k}$<br>[%] | $E_{el}$<br>[MN/m²] | $q_u$<br>[kN/m²] | $\varepsilon_u$<br>[%] | $E_{pl}$<br>[MN/m²] |
| G 170 (2010)                | DV 1                 | 0,286 | 0,885 | 2262,4                         | 1,08         | 210,0                     | 4327,5                     | 7,4                 | 32,6             |                        |                     |
|                             | DV 2                 | 0,284 | 0,886 | 2274,0                         | 0,72         | 316,4                     | 4149,0                     | 8,7                 | 23,5             |                        |                     |
|                             | DV 3                 | 0,291 | 0,883 | 1998,1                         | 0,82         | 243,3                     | 3385,4                     | 3,9                 | 45,4             |                        |                     |
|                             | DV 4                 | 0,286 | 0,885 | 1876,6                         | 0,76         | 246,7                     | 3489,6                     | 8,3                 | 21,3             |                        |                     |
|                             | DV 5                 | 0,268 | 0,893 | 1786,2                         | 0,92         | 194,0                     | 2980,2                     | 9,5                 | 13,9             |                        |                     |
|                             | DV 6                 | 0,286 | 0,885 | 2340,0                         | 0,60         | 389,7                     | 4163,9                     | 9,3                 | 20,9             |                        |                     |
|                             | DV 7                 | 0,270 | 0,892 | 1935,9                         | 0,53         | 366,9                     | 3110,5                     | 6,7                 | 19,0             |                        |                     |
|                             | DV 8                 | 0,300 | 0,880 | 2260,5                         | 0,51         | 446,6                     | 3331,5                     | 5,1                 | 23,6             |                        |                     |
|                             | DV 9                 | 0,282 | 0,887 | 1776,5                         | 0,33         | 541,6                     | 3257,9                     | 6,9                 | 22,4             |                        |                     |
|                             | DV 10                | 0,271 | 0,891 | 2245,6                         | 0,39         | 576,7                     | 2245,6                     | 0,4                 | -                |                        |                     |
|                             | MW <sup>1)</sup>     | 0,282 | 0,887 | 2075,6                         | 0,67         | 353,2                     | 3444,1                     | 6,6                 | 24,7             |                        |                     |
|                             | Minimum              | 0,268 | 0,880 | 1776,5                         | 0,33         | 194,0                     | 2245,6                     | 0,4                 | 13,9             |                        |                     |
|                             | Maximum              | 0,300 | 0,893 | 2340,0                         | 1,08         | 576,7                     | 4327,5                     | 9,5                 | 45,4             |                        |                     |
|                             | STABW <sup>2)</sup>  | 0,010 | 0,004 | 211,1                          | 0,23         | 129,0                     | 600,9                      | 2,70                | 8,67             |                        |                     |
|                             | Var. % <sup>3)</sup> | 3,4   | 0,4   | 10,2                           | 34,0         | 36,5                      | 17,4                       | 40,7                | 35,1             |                        |                     |

<sup>1)</sup> arithmetischer Mittelwert

<sup>2)</sup> Standardabweichung basierend auf der Glockenkurve nach Gauß

<sup>3)</sup> Variationskoeffizient = Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert in %



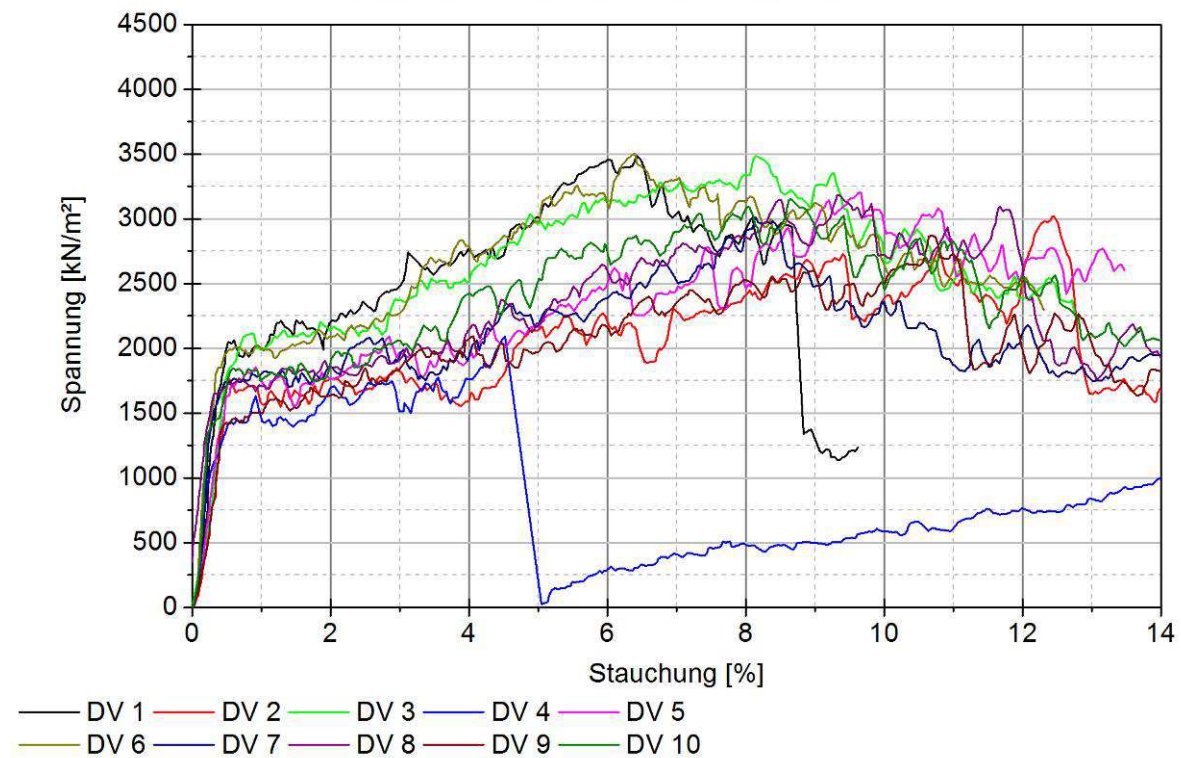


Abbildung 3-14: Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen des Materialtyps G210 (2011)

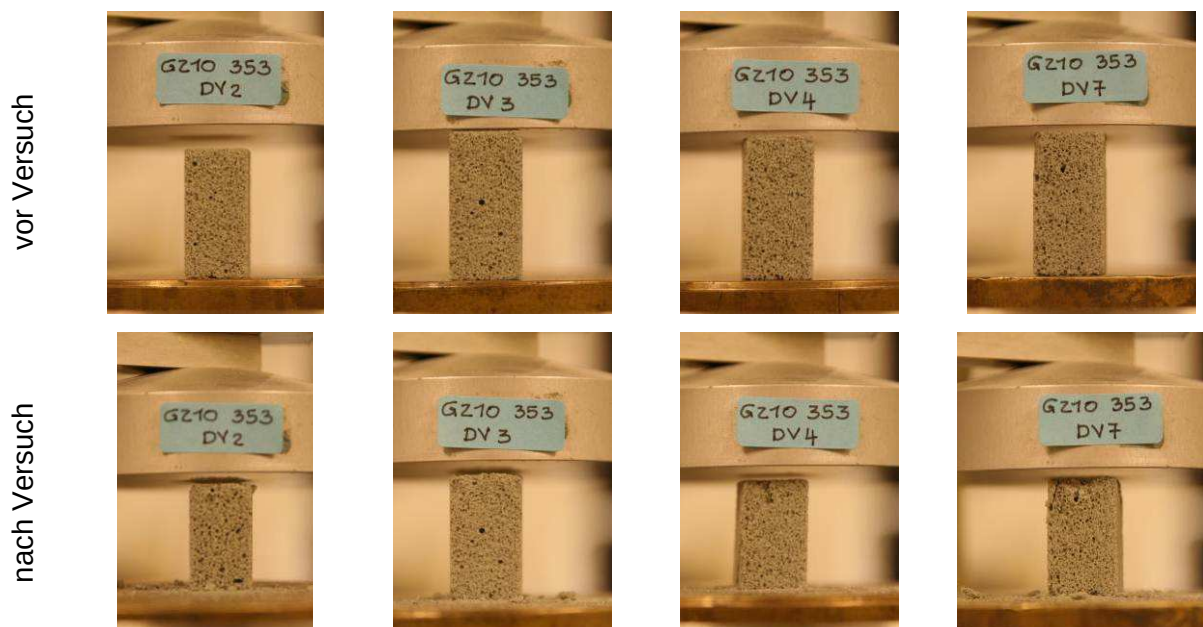


Abbildung 3-15: Prismen vor und nach dem einaxialen Druckversuch, Materialtyp G210 (2011) (exemplarisch)

Tabelle 3-7: Kennwerte der untersuchten Glasschaumprismen des Materialtyps G210 (2011)

| <u>Eigenschaften Prisma</u> |                             |                     |              | <u>Festigkeiten Prisma</u>     |                         |                     |                       |                     |                     |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
|                             |                             |                     |              | Druckfestigkeit $\sigma_{c,k}$ |                         |                     | Bruchfestigkeit $q_u$ |                     |                     |
|                             |                             | $\rho_s$<br>[g/cm³] | $n_s$<br>[-] | $\sigma_{c,k}$<br>[kN/m²]      | $\epsilon_{c,k}$<br>[%] | $E_{el}$<br>[MN/m²] | $q_u$<br>[kN/m²]      | $\epsilon_u$<br>[%] | $E_{pl}$<br>[MN/m²] |
| G210 (2011)                 | DV 1                        | 0,291               | 0,883        | 2064,2                         | 0,61                    | 340,7               | 3487,9                | 6,4                 | 24,4                |
|                             | DV 2                        | 0,269               | 0,892        | 1760,4                         | 0,54                    | 327,2               | 3018,7                | 12,4                | 10,6                |
|                             | DV 3                        | 0,288               | 0,884        | 2114,5                         | 0,89                    | 236,3               | 3482,3                | 8,1                 | 18,9                |
|                             | DV 4                        | 0,260               | 0,895        | 1631,5                         | 0,92                    | 177,9               | 2090,4                | 4,5                 | 12,7                |
|                             | DV 5                        | 0,273               | 0,890        | 1856,2                         | 0,92                    | 201,7               | 3199,3                | 9,7                 | 15,4                |
|                             | DV 6                        | 0,289               | 0,884        | 2006,9                         | 0,62                    | 324,9               | 3502,4                | 6,4                 | 25,9                |
|                             | DV 7                        | 0,285               | 0,885        | 1764,7                         | 0,60                    | 292,0               | 3009,7                | 8,1                 | 16,5                |
|                             | DV 8                        | 0,265               | 0,893        | 1748,6                         | 0,73                    | 239,8               | 3183,3                | 9,4                 | 16,6                |
|                             | DV 9                        | 0,267               | 0,892        | 1450,2                         | 0,58                    | 250,0               | 2871,8                | 10,7                | 14,1                |
|                             | DV 10                       | 0,287               | 0,884        | 1843,2                         | 0,59                    | 311,8               | 3153,5                | 8,7                 | 16,3                |
|                             | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,277</b>        | <b>0,888</b> | <b>1824,0</b>                  | <b>0,70</b>             | <b>270,2</b>        | <b>3099,9</b>         | <b>8,4</b>          | <b>17,1</b>         |
|                             | Minimum                     | 0,260               | 0,883        | 1450,2                         | 0,54                    | 177,9               | 2090,4                | 4,5                 | 10,6                |
|                             | Maximum                     | 0,291               | 0,895        | 2114,5                         | 0,92                    | 340,7               | 3502,4                | 12,4                | 25,9                |
|                             | STABW <sup>2)</sup>         | 0,011               | 0,004        | 191,56                         | 0,15                    | 54,0                | 395,52                | 2,17                | 4,6                 |
|                             | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>4,0</b>          | <b>0,5</b>   | <b>10,5</b>                    | <b>20,8</b>             | <b>20,0</b>         | <b>12,8</b>           | <b>25,7</b>         | <b>26,7</b>         |

<sup>1)</sup> arithmetischer Mittelwert

<sup>2)</sup> Standardabweichung basierend auf der Glockenkurve nach Gauß

<sup>3)</sup> Variationskoeffizient = Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert in %

Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 zeigen den Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  bzw. der Bruchfestigkeit  $q_u$  und der Rohdichte  $\rho_s$  für alle durchgeführten einaxialen Druckversuche.

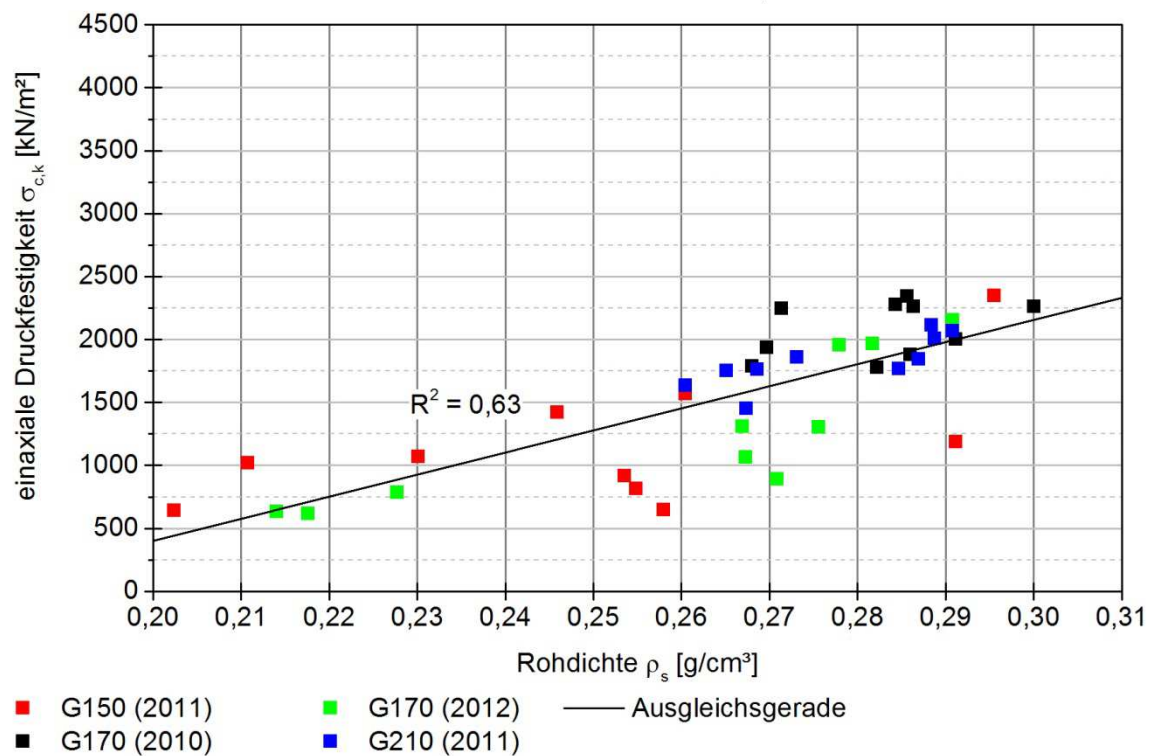
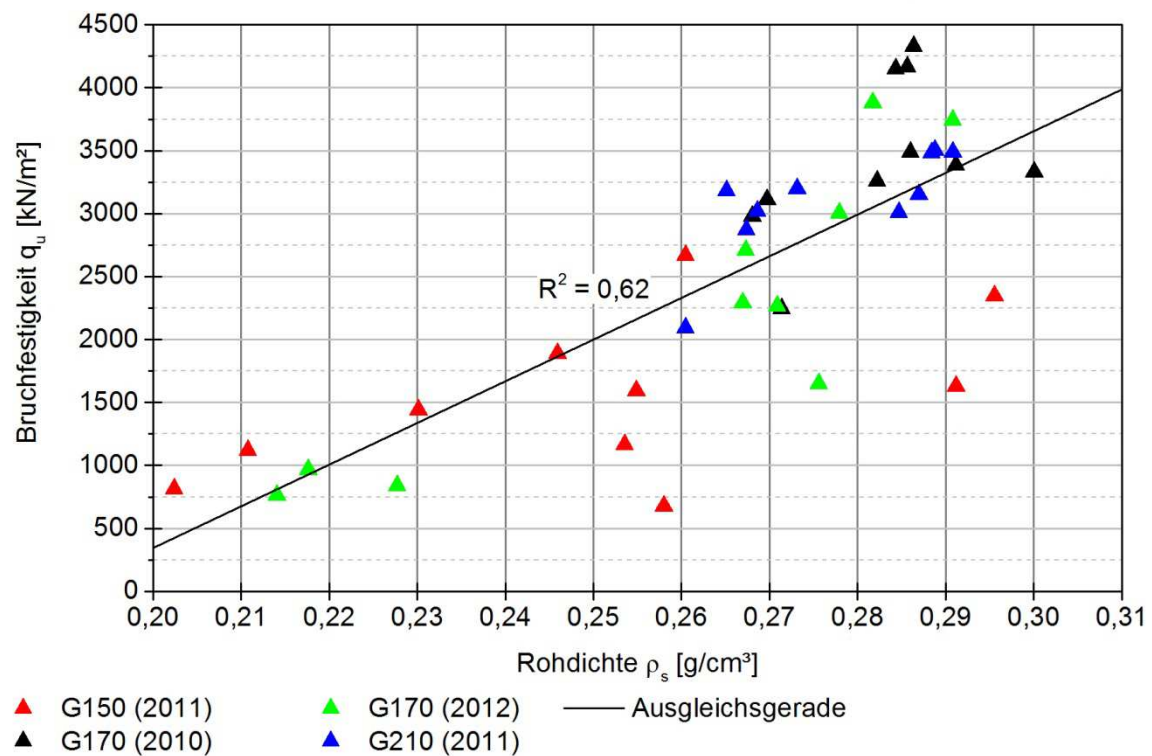
Zusammenhang einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  - Rohdichte  $\rho_s$ Abbildung 3-16: Zusammenhang zwischen einaxialer Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  und Rohdichte  $\rho_s$ Zusammenhang Bruchfestigkeit  $q_u$  - Rohdichte  $\rho_s$ Abbildung 3-17: Zusammenhang zwischen einaxialer Bruchfestigkeit  $q_u$  und Rohdichte  $\rho_s$

Tabelle 3-8: Übersicht zu den Kennwerten der untersuchten Glasschaumprismen

| Eigenschaften Prisma |                             |              |              | Festigkeiten Prisma            |                  |              |                       |              |             |
|----------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------------------------|------------------|--------------|-----------------------|--------------|-------------|
|                      |                             | $\rho_s$     | $\eta_s$     | Druckfestigkeit $\sigma_{c,k}$ |                  |              | Bruchfestigkeit $q_u$ |              |             |
|                      |                             | [g/cm³]      | [-]          | $\sigma_{c,k}$                 | $\epsilon_{c,k}$ | $E_{el}$     | $q_u$                 | $\epsilon_u$ | $E_{pl}$    |
|                      |                             |              |              | [kN/m²]                        | [%]              | [MN/m²]      | [kN/m²]               | [%]          | [MN/m²]     |
| G150 (2011)          | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,250</b> | <b>0,901</b> | <b>1162,4</b>                  | <b>0,50</b>      | <b>235,5</b> | <b>1534,0</b>         | <b>6,4</b>   | <b>13,5</b> |
|                      | Minimum                     | 0,202        | 0,883        | 639,5                          | 0,37             | 150,8        | 677,5                 | 0,5          | 0,4         |
|                      | Maximum                     | 0,296        | 0,920        | 2348,4                         | 0,67             | 490,3        | 2666,5                | 11,6         | 38,1        |
|                      | STABW <sup>2)</sup>         | 0,029        | 0,011        | 488,97                         | 0,10             | 100,4        | 604,99                | 4,34         | 12,75       |
|                      | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>11,4</b>  | <b>1,3</b>   | <b>42,1</b>                    | <b>19,4</b>      | <b>42,6</b>  | <b>39,4</b>           | <b>67,5</b>  | <b>94,1</b> |
| G170 (2012)          | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,259</b> | <b>0,897</b> | <b>1267,3</b>                  | <b>0,59</b>      | <b>239,2</b> | <b>2210,8</b>         | <b>8,4</b>   | <b>11,2</b> |
|                      | Minimum                     | 0,214        | 0,884        | 615,6                          | 0,38             | 116,3        | 761,4                 | 1,5          | 3,3         |
|                      | Maximum                     | 0,291        | 0,914        | 2153,6                         | 0,79             | 568,7        | 3879,3                | 12,4         | 21,1        |
|                      | STABW <sup>2)</sup>         | 0,027        | 0,011        | 547,76                         | 0,14             | 154,9        | 1088,85               | 3,03         | 6,4         |
|                      | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>10,3</b>  | <b>1,2</b>   | <b>43,2</b>                    | <b>23,8</b>      | <b>64,8</b>  | <b>49,3</b>           | <b>35,9</b>  | <b>57,3</b> |
| G170 (2010)          | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,282</b> | <b>0,887</b> | <b>2075,6</b>                  | <b>0,67</b>      | <b>353,2</b> | <b>3444,1</b>         | <b>6,6</b>   | <b>24,7</b> |
|                      | Minimum                     | 0,268        | 0,880        | 1776,5                         | 0,33             | 194,0        | 2245,6                | 0,4          | 13,9        |
|                      | Maximum                     | 0,300        | 0,893        | 2340,0                         | 1,08             | 576,7        | 4327,5                | 9,5          | 45,4        |
|                      | STABW <sup>2)</sup>         | 0,010        | 0,004        | 211,1                          | 0,23             | 129,0        | 600,9                 | 2,70         | 8,67        |
|                      | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>3,4</b>   | <b>0,4</b>   | <b>10,2</b>                    | <b>34,0</b>      | <b>36,5</b>  | <b>17,4</b>           | <b>40,7</b>  | <b>35,1</b> |
| G210 (2011)          | <b>MW <sup>1)</sup></b>     | <b>0,277</b> | <b>0,888</b> | <b>1824,0</b>                  | <b>0,70</b>      | <b>270,2</b> | <b>3099,9</b>         | <b>8,4</b>   | <b>17,1</b> |
|                      | Minimum                     | 0,260        | 0,883        | 1450,2                         | 0,54             | 177,9        | 2090,4                | 4,5          | 10,6        |
|                      | Maximum                     | 0,291        | 0,895        | 2114,5                         | 0,92             | 340,7        | 3502,4                | 12,4         | 25,9        |
|                      | STABW <sup>2)</sup>         | 0,011        | 0,004        | 191,56                         | 0,15             | 54,0         | 395,52                | 2,17         | 4,6         |
|                      | <b>Var. % <sup>3)</sup></b> | <b>4,0</b>   | <b>0,5</b>   | <b>10,5</b>                    | <b>20,8</b>      | <b>20,0</b>  | <b>12,8</b>           | <b>25,7</b>  | <b>26,7</b> |

<sup>1)</sup> arithmetischer Mittelwert

<sup>2)</sup> Standardabweichung basierend auf der Glockenkurve nach Gauß

<sup>3)</sup> Variationskoeffizient = Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert in %

Vergleicht man die Ergebnisse unter Berücksichtigung aller Materialtypen, so kann Folgendes festgestellt werden:

Obwohl die Materialtypen G170 (2010) und G170 (2012) seitens des Herstellers als Perimeter 50/170 ausgeliefert wurden, zeigte sich ein großer Unterschied zwischen den einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  der beiden Materialchargen.

Hingegen zeigt ein Vergleich der Versuchsergebnisse der Materialtypen G150 (2011) und G170 (2012), dass sich die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  kaum voneinander unterscheiden, obwohl es sich um unterschiedliche Produkte handelt.

Vergleicht man die Variationskoeffizienten der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  und der Bruchfestigkeit  $q_u$ , so zeigt sich, dass – mit Ausnahme des Materialtyps G150 (2011) – diese bei der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  kleiner sind, als bei der Bruchfestigkeit  $q_u$ .

Vergleicht man die E-Moduln  $E_{el}$  und  $E_{pl}$ , so zeigt sich, dass die E-Moduln  $E_{el}$  im Mittel um das ca. 16-fache größer sind als die E-Moduln  $E_{pl}$ .

Ein allgemeingültiger, korrelierbarer Zusammenhang zwischen der Rohdichte  $\rho_s$  und der einaxialen Druckfestigkeit sowie der Bruchfestigkeit  $q_u$  ist nicht gegeben.

### 3.2.3.2 Interpretation des charakteristischen Verlaufs der Arbeitslinie

Im Zuge der durchgeführten Versuche konnte beobachtet werden, dass ab Überschreiten der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  vermehrt Kornabplatzungen auftreten. Beim Ausbau der Proben aus der Presse konnte weiters festgestellt werden, dass sich jeweils an den Lasteinleitungsflächen an der Ober- und Unterseite eine Schicht bestehend aus reinem Glaspulver ausgebildet hatte.

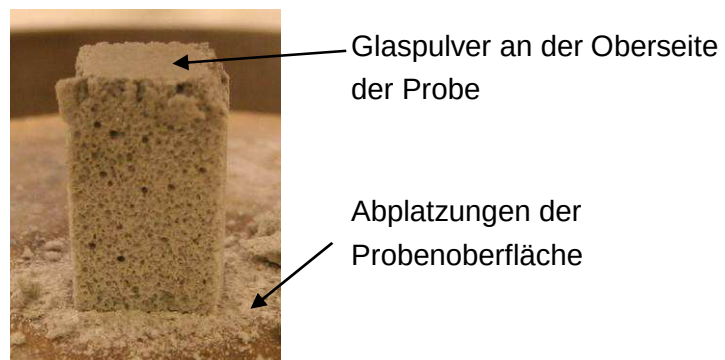


Abbildung 3-18: Getestetes Glasschaumprisma

Ein Zusammenhang zwischen der sich bildenden Glaspulverschicht an der oberen und unteren Lasteinleitungsfläche und den auftretenden Probenverformungen wurde mit Hilfe eines einaxialen Druckversuches, dessen Ergebnisse im Folgenden im Detail aufgezeigt werden, hergestellt.

Grunddaten Versuchsprisma:

|                          |                                            |
|--------------------------|--------------------------------------------|
| Materialtyp:             | G170 (2010)                                |
| Prismenhöhe:             | 36,3 mm                                    |
| Abmessungen Grundfläche: | $A = 18,3 \cdot 18,3 = 334,9 \text{ mm}^2$ |
| Masse des Prismas:       | $m_s = 3,966 \text{ g}$                    |
| Volumen des Prismas:     | $V_{\text{Prisma}} = 12,157 \text{ cm}^3$  |

Anhand des Volumens  $V_{\text{Prisma}}$  und der Masse  $m_s$  des Prismas errechnet sich die Rohdichte  $\rho_s$  zu:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_{\text{Prisma}}} = \frac{3,966}{12,157} = 0,326 \text{ g/cm}^3 \quad (3-5)$$

Das Prisma wurde über die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  hinaus beansprucht, jedoch wurde der Versuch vor Erreichen der einaxialen Bruchfestigkeit  $q_u$  beendet und die Verformung des Prismas zu Versuchsende  $s_{\text{Ende}}$  dokumentiert.

$$s_{\text{Ende}} = 3,628 \text{ mm} \quad (3-6)$$

Anschließend wurde das in den Kontaktflächen entstandene Glaspulver gesammelt und gewogen -  $m_{\text{Abrieb}}$ .

$$m_{\text{Abrieb}} = 0,364 \text{ g} \quad (3-7)$$

Dividiert man die Masse des Glaspulvers  $m_{\text{Abrieb}}$  durch die Rohdichte  $\rho_s$ , erhält man das Volumen  $V_{\text{Abrieb}}$  des zerriebenen Glasschaums zu:

$$V_{\text{Abrieb}} = \frac{m_{\text{Abrieb}}}{\rho_s} = \frac{0,364}{0,326} = 1,117 \text{ cm}^3 \quad (3-8)$$

Der Quotient aus dem Volumen  $V_{\text{Abrieb}}$  und der Querschnittsfläche  $A$  des Prismas liefert die fiktive Höhe  $h_{\text{Abrieb}}$  jenes Teils des Glasschaumprismas, der zerrieben wird.

$$h_{\text{Abrieb}} = \frac{V_{\text{Abrieb}}}{A} = \frac{1,117}{3,349} = 0,3335 \text{ cm} \hat{=} 3,335 \text{ mm} \quad (3-9)$$

Die zur einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Glasschaumprismas zugehörige Verformung  $s_{c,k}$  ergibt sich zu: (s. Abbildung 3-19).

$$s_{c,k} = 0,280 \text{ mm} \quad (3-10)$$

Die Differenz der Verformungen am Ende des Versuchs  $s_{\text{Ende}}$  und  $s_{c,k}$  berechnet sich zu

$$\Delta s = s_{\text{Ende}} - s_{c,k} = 3,628 - 0,280 = 3,348 \text{ mm} \quad (3-11)$$

und stellt jene Verformung dar, die ab dem Überschreiten der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  bis zum Ende des Versuches auftritt.

Ein Vergleich der Werte  $\Delta s$  und  $h_{\text{Abrieb}}$  zeigt, dass diese nahezu in derselben Größenordnung liegen. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Großteil der sich einstellenden Verformung, ab Überschreiten der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$ , auf den Kornabrieb in der Lasteinleitungsfläche zurückgeführt werden kann.

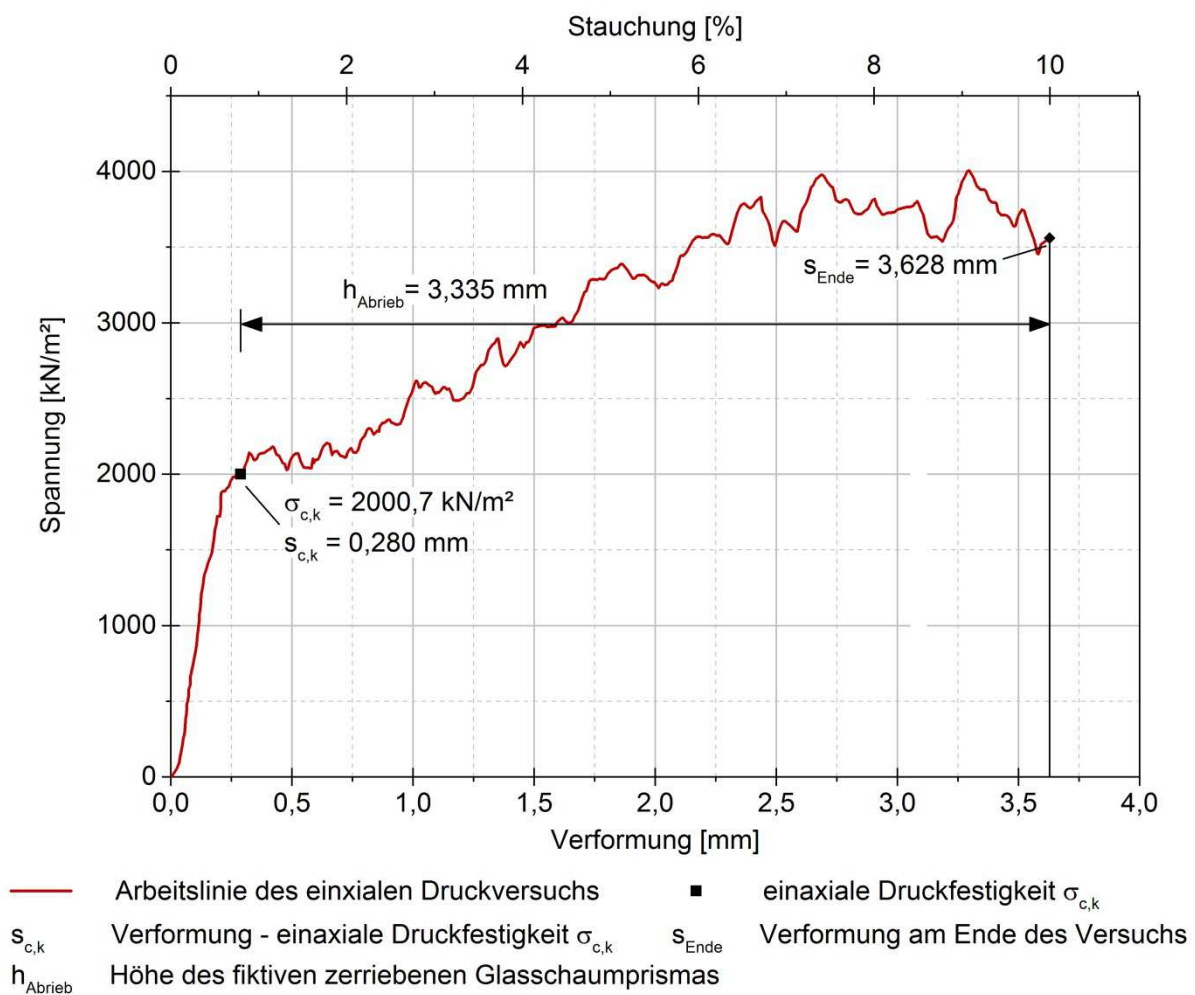


Abbildung 3-19: Darstellung Zusammenhang Verformung bei Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit, Verformung aus Kornabrieb und der Prismenverformung am Ende des Versuchs, Materialtyp G170 (2010)

Zur Untermauerung dieses Ergebnisses wurden 4 weitere Druckversuche an Prismen des Materialtyps G170 (2010) durchgeführt, jedoch mit dem Unterschied, dass diese an der oberen und unteren Grundfläche mit einer Zementsuspension beschichtet wurden. Durch die Beschichtung wurde die Bildung der Glaspulverschicht in den Kontaktflächen verhindert, weshalb sich im Vergleich zu jenen Proben ohne Beschichtung ein deutlich anderes Spannungs-Stauchungsverhalten einstellte.

Die Arbeitslinien der beschichteten Proben weisen bis zum spröden Versagen einen nahezu linearen Anstieg auf (s. Abbildung 3-20). Ein Steifigkeitsabfall mit einem nachfolgenden duktilen Materialverhalten konnte nicht mehr beobachtet werden, da ein Verhindern des Kornabriebs auch die daraus resultierenden Verformungen verhindert. Bis zu einer Stauchung von ca. 0,4% verlaufen die Arbeitslinien nahezu identisch (s. Abbildung 3-21).



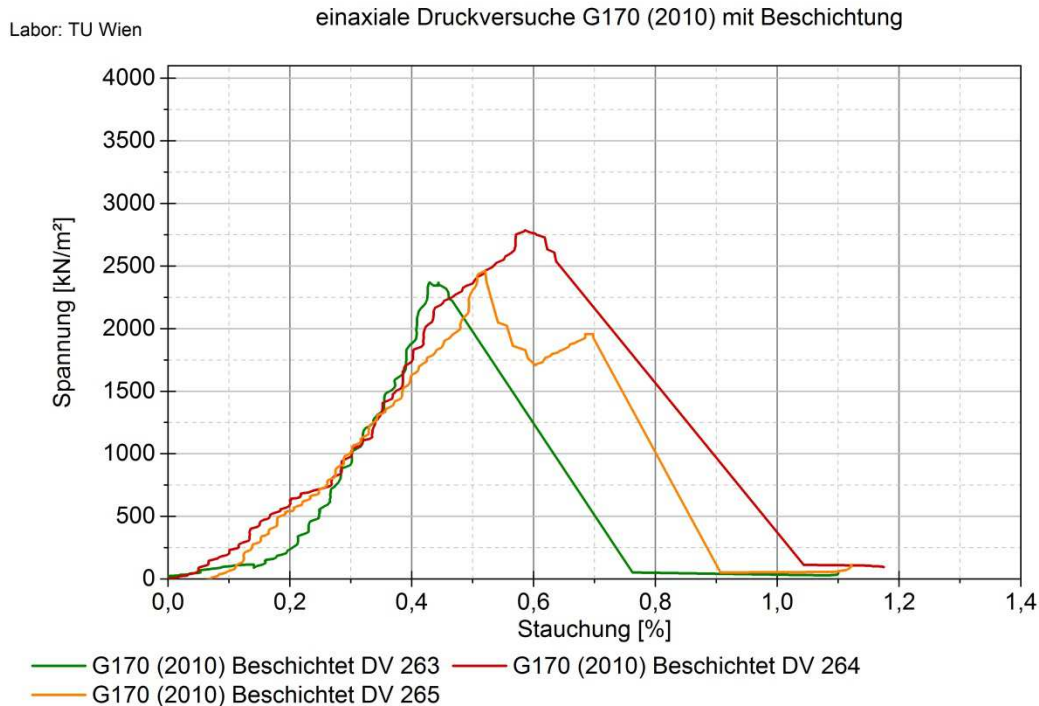


Abbildung 3-20: Spannungs-Stauchungsverhalten von Glasschaumprismen mit Beschichtung in den Lasteinleitungsflächen (erhärtete Zementsuspension) im Zuge des einaxialen Druckversuches, Materialtyp G170 (2010)

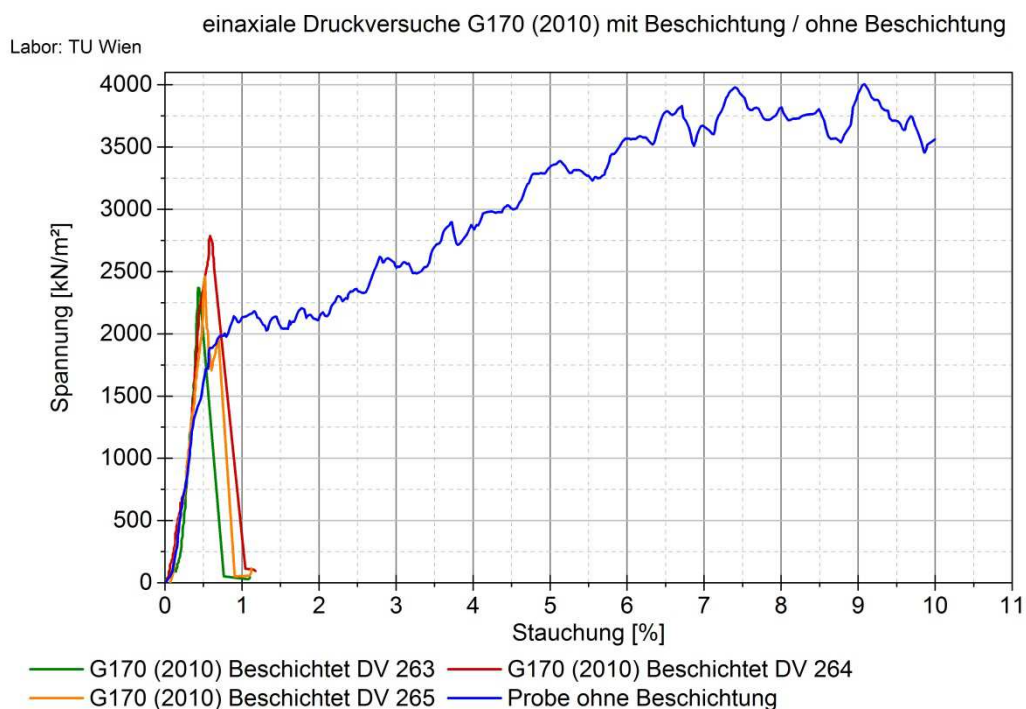


Abbildung 3-21: Vergleich des Spannungs-Stauchungsverhaltens von Glasschaumprismen mit und ohne Beschichtung in den Lasteinleitungsflächen (erhärtete Zementsuspension) im Zuge des einaxialen Druckversuches, Materialtyp G170 (2010)



Abbildung 3-21 zeigt weiters, dass die beschichteten Proben im Vergleich zu den nicht beschichteten Proben eine geringere Bruchfestigkeit  $q_u$  aufweisen, was lediglich auf einen Mangel bei der Herstellung der Planparallelität der beschichteten Oberflächen zurückgeführt werden kann.

In Tabelle 3-9 sind die Bruchfestigkeit  $q_u$ , die zugehörige Stauchung und die Rohdichte  $\rho_s$  der beschichteten Prismen angeführt. Die Rohdichte wurde vor dem Auftragen der Beschichtung bestimmt. Anhand von Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop ist ersichtlich, dass die Zementsuspension nur in die an der Oberfläche vorhandenen offenen Poren eindringt und somit die innere Struktur der beschichteten Proben nicht verändert (s. Abbildung 3-22).

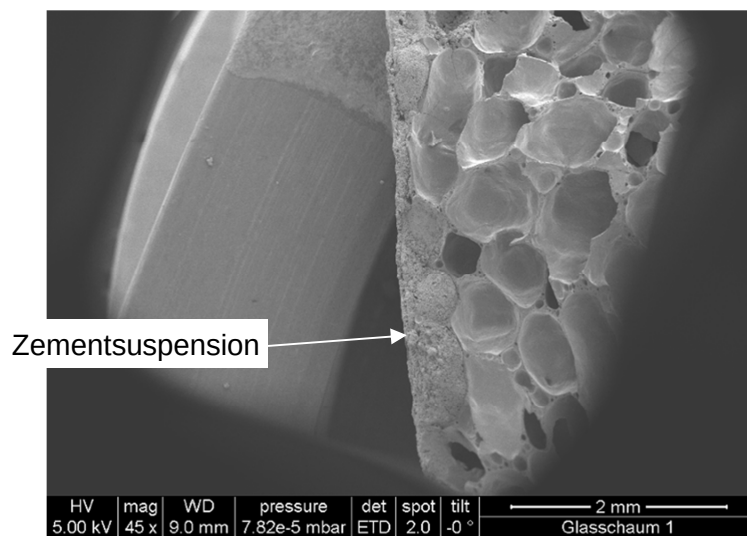


Abbildung 3-22: Aufnahme eines beschichteten Prismas mit dem Rasterelektronenmikroskop [USTEM TU Wien 2012]



Abbildung 3-23: Beschichtete Prismen nach durchgeführten Druckversuch

Tabelle 3-9: Resultate der einaxialen Druckversuche von Glasschaumprismen mit Beschichtung des Materialtyps G170 (2010)

| G170 (2010)<br>beschichtet |                         | Bruchfestigkeit $q_u$ |                   |                      |             |                      |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------|----------------------|
|                            |                         | Rohdichte $\rho_s$    | Porenanteil $n_s$ | Spannung             | Stauchung   | E-Modul              |
|                            |                         | [g/cm <sup>3</sup> ]  | [-]               | [kN/m <sup>2</sup> ] | [%]         | [MN/m <sup>2</sup> ] |
|                            | 263                     | 0,317                 | 0,873             | 2368,7               | 0,43        | 550,9                |
|                            | 264                     | 0,285                 | 0,886             | 2784,0               | 0,59        | 471,9                |
|                            | 265                     | 0,270                 | 0,892             | 2458,5               | 0,52        | 472,8                |
|                            | <b>MW <sup>1)</sup></b> | <b>0,291</b>          | <b>0,883</b>      | <b>2537,2</b>        | <b>0,51</b> | <b>498,5</b>         |

<sup>1)</sup> Abkürzung arithmetischer Mittelwert

### 3.2.3.3 Unterschiede zwischen Erst- und Wiederbelastung

Die Lastaufbringung auf das Prisma erfolgte bei diesem Versuch in Form von Lastzyklen (Be- und Entlastung) mit einer kontinuierlichen Steigerung der Spannung je Lastzyklus (s. Abbildung 3-24). Abbildung 3-25 zeigt das zugehörige Spannung-Stauchungsverhalten des getesteten Prismas.

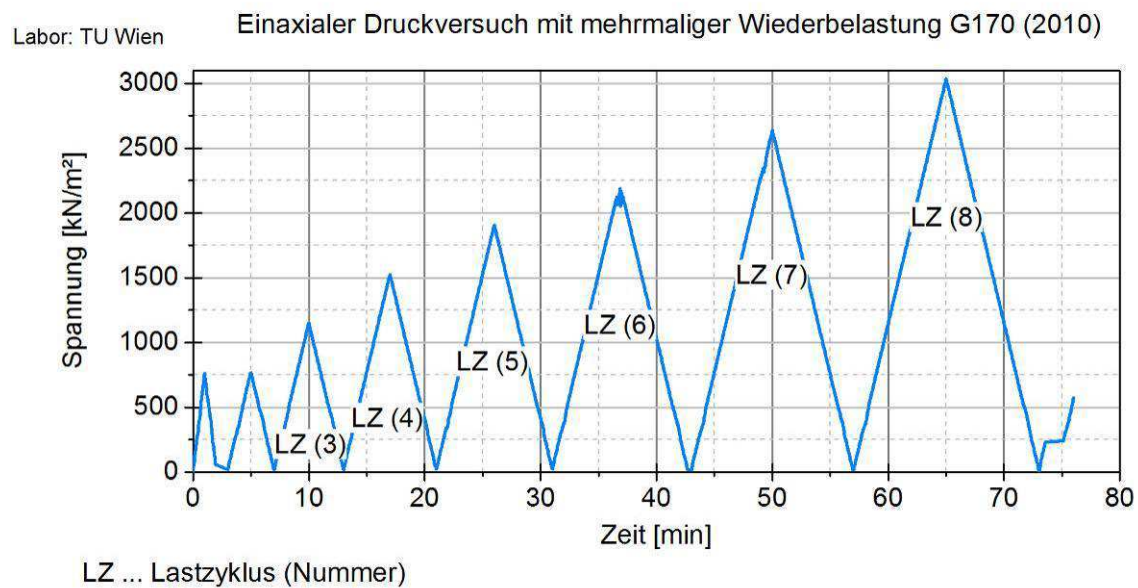


Abbildung 3-24: Zyklische Beanspruchung eines Prismas, Materialtyp G170 (2010)

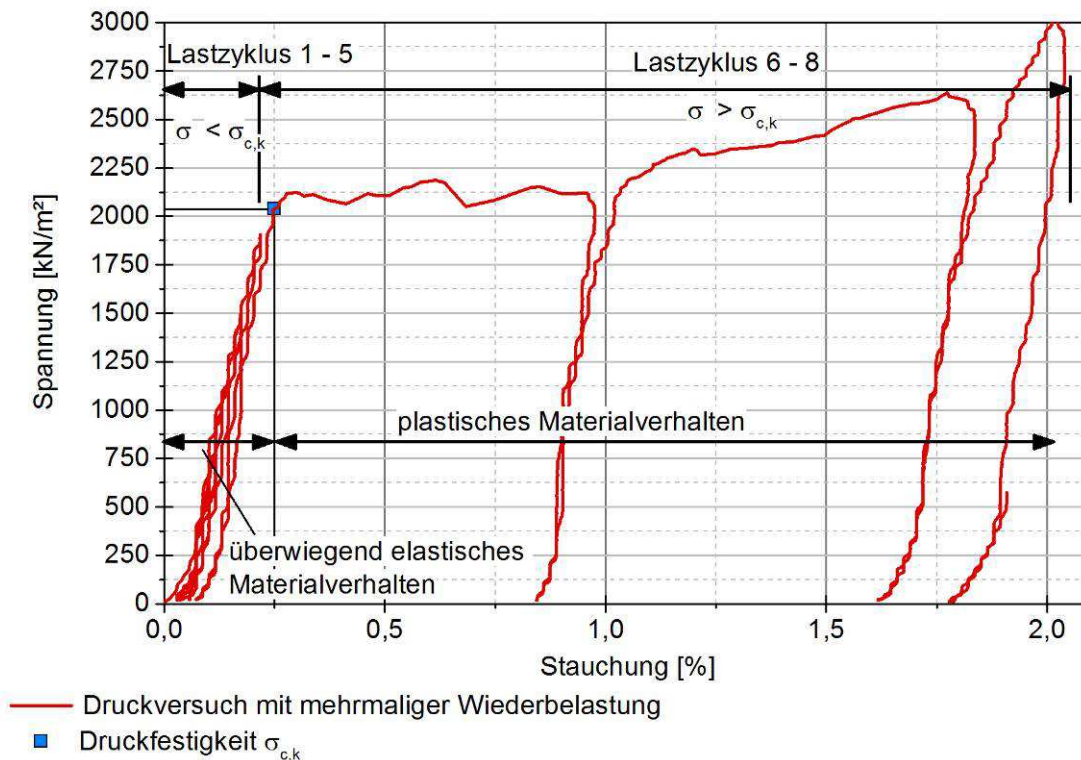


Abbildung 3-25: Spannungs-Stauchungsverhalten eines Glasschaumprismas bei zyklischer Belastung, Materialtyp G170 (2010)

Innerhalb der ersten 5 Lastzyklen wurde die Spannung  $\sigma$  nicht über  $\sigma_{c,k}$  gesteigert, weshalb sie sich kaum voneinander unterscheiden und somit ein nahezu elastisches Materialverhalten vorliegt. Im Zuge der Lastzyklen 6 ÷ 8 wurde die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  jeweils überschritten, mit dem Resultat, dass es zu signifikanten Zuwächsen der Stauchungen kam. Vergleicht man die Arbeitslinien der Lastzyklen 6 ÷ 8 für einen Bereich der Spannungen  $\sigma < \sigma_{c,k}$ , so unterscheiden sich diese kaum voneinander. Somit liegt für die Spannungen  $\sigma < \sigma_{c,k}$  der Wiederbelastung (Lastzyklen 6 ÷ 8) ein zwar ein nicht lineares, aber praktisch „elastisches Materialverhalten“ vor.

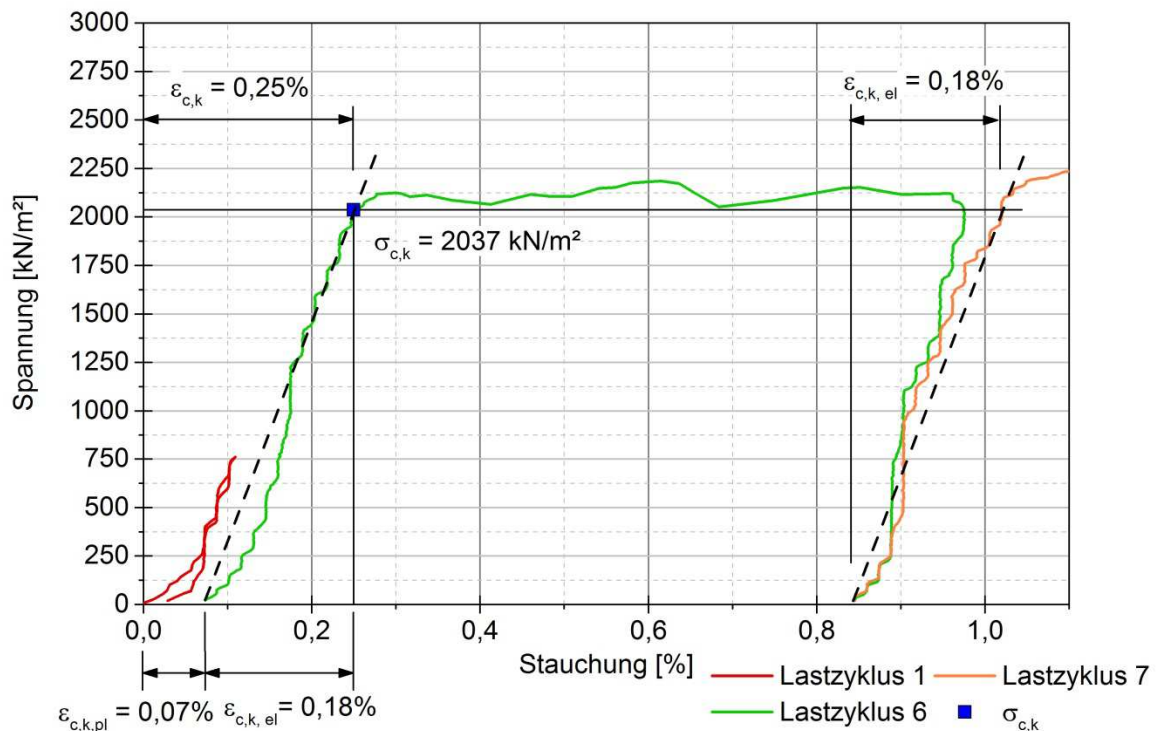
In Abbildung 3-26 sind die Arbeitslinien der Lastzyklen 1, 6 und 7 im Detail dargestellt. Vergleicht man die Stauchungen der Lastzyklen 1 und 6 bei Belastungsbeginn, so zeigt sich, dass sich dieser beim Lastzyklus 6 um den Betrag der Stauchung  $\epsilon_{c,k,pl}$  verschoben hat. Diese Stauchung entspricht einer plastischen Stauchung der Probe, welche auf folgende Ursachen zurückgeführt werden kann:

- eine ungenügende Planparallelität zwischen der oberen und unteren Lasteinleitungsfläche
- den sich während der Laststeigerung einstellenden Formschluss zwischen der Oberseite des Prismas und dem Laststempel der Presse

Die Steigung der Arbeitslinien der Lastzyklen 6 und 7 sind für Spannungen  $\sigma < \sigma_{c,k}$  identisch und es liegt, wie oben bereits beschreiben, für Spannungen  $\sigma < \sigma_{c,k}$  der Wiederbelastung ein

nicht lineares, quasi-elastisches Spannungs-Stauchungsverhalten des Glasschaumprismas vor.

Labor: TU Wien



$\varepsilon_{c,k,pl}$  ... Verschiebung der Arbeitslinien bei Belastungsbeginn der Lastzyklen 1 - 6 (= plastische Stauchung des Prismas)

$\varepsilon_{c,k,el}$  ... elastische Stauchung des Prismas für Spannungen von  $\sigma < \sigma_{c,k}$  der Lastzyklen 6 & 7

Abbildung 3-26: Ausschnitt aus Spannungs-Stauchungsverhalten eines Glasschaumprismas bei zyklischer Belastung, Materialtyp G170 (2010)

### 3.2.3.4 Langzeitverhalten von Glasschaumprismen im einaxialen Spannungszustand

Neben den zuvor beschriebenen Versuchen soll auch das zeitabhängige Materialverhalten von Glasschaumprismen im einaxialen Druckversuch untersucht werden. Hierfür wurden die Proben mit einer konstanten Spannung von  $\sigma = 500 \text{ kN/m}^2$ ,  $800 \text{ kN/m}^2$ ,  $1100 \text{ kN/m}^2$ ,  $1400 \text{ kN/m}^2$ ,  $1700 \text{ kN/m}^2$ ,  $2000 \text{ kN/m}^2$  für eine Zeitdauer von mehreren Tagen beansprucht.

Abbildung 3-27 zeigt die Entwicklung der Stauchungen über die Zeit anhand von 8 Prismen des Materialtyps G170 (2010). Es zeigt sich, dass der Zuwachs der Stauchungen ca. 6 Tage nach Belastungsbeginn endet.

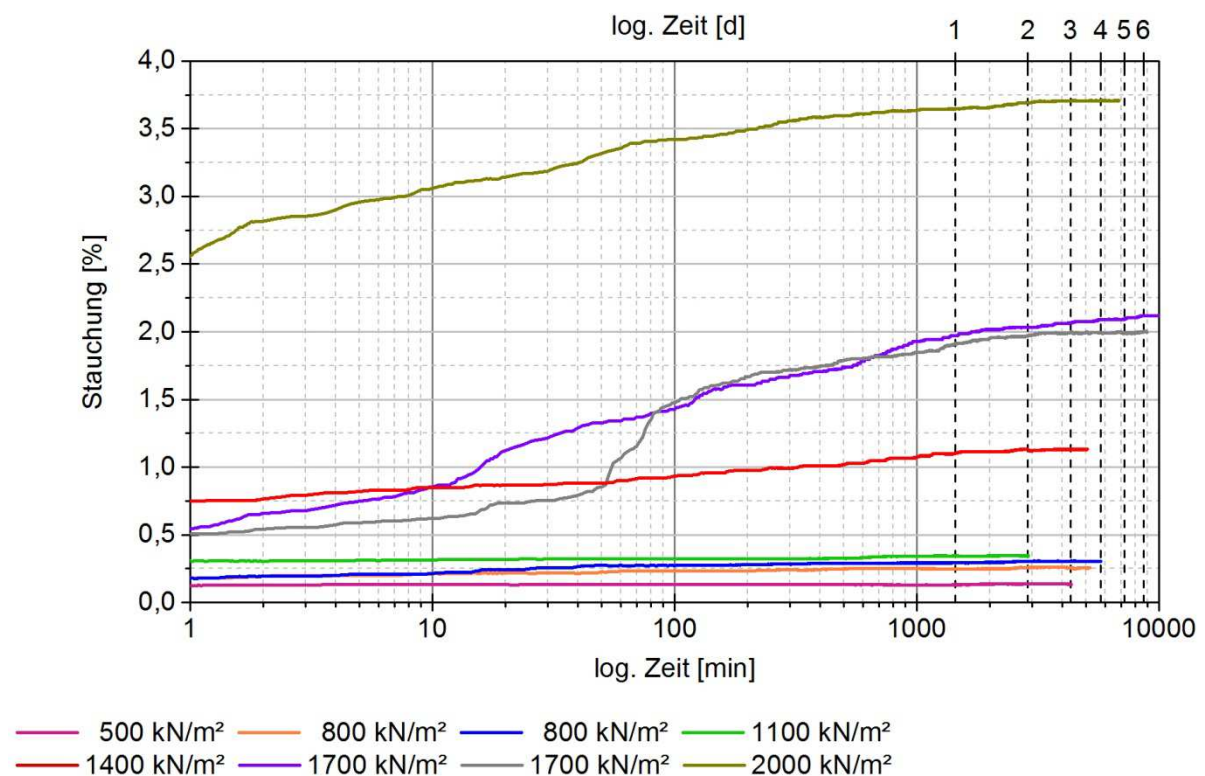
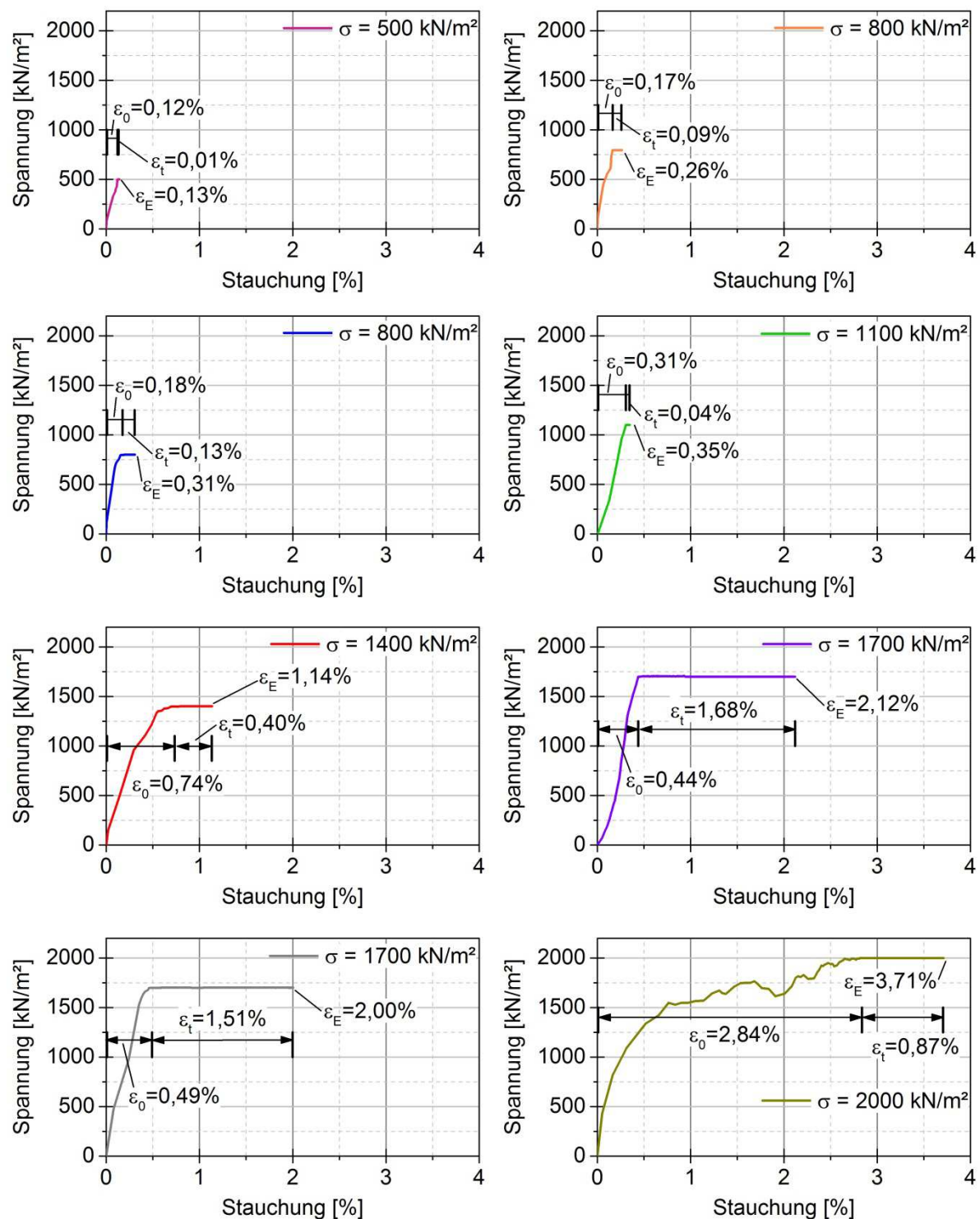


Abbildung 3-27: Zeit- und spannungsabhängiges Materialverhalten von Glasschaumprismen im Zuge von einaxialen Beanspruchungen, Materialtyp G170 (2010)

In Abbildung 3-28 sind die Arbeitslinien der Proben der einaxialen Langzeitversuche dargestellt. Die Stauchung, die sich im Zuge der Belastung bei der jeweiligen Anfangsspannung  $\sigma$  einstellt, wird mit  $\epsilon_0$  bezeichnet. Die Stauchung am Ende des Versuchs wird mit  $\epsilon_E$  bezeichnet. Die Differenz der beiden Stauchungen  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_E$  ergibt die Stauchung  $\epsilon_t$ , die aus dem zeitlichen Zuwachs der Stauchungen bei der jeweiligen konstanten Spannung  $\sigma$  resultiert.





$\epsilon_0$  ... Stauchung bei Erreichen der Spannung  $\sigma$   
 $\epsilon_E$  ... Stauchung am Ende des Versuchs  
 $\epsilon_t$  ... zeitabhängiger Zuwachs der Stauchung bei konstanter Spannung  $\sigma$

Abbildung 3-28: Arbeitslinien der einaxialen Langzeit-Druckversuche, Materialtyp G170 (2010)

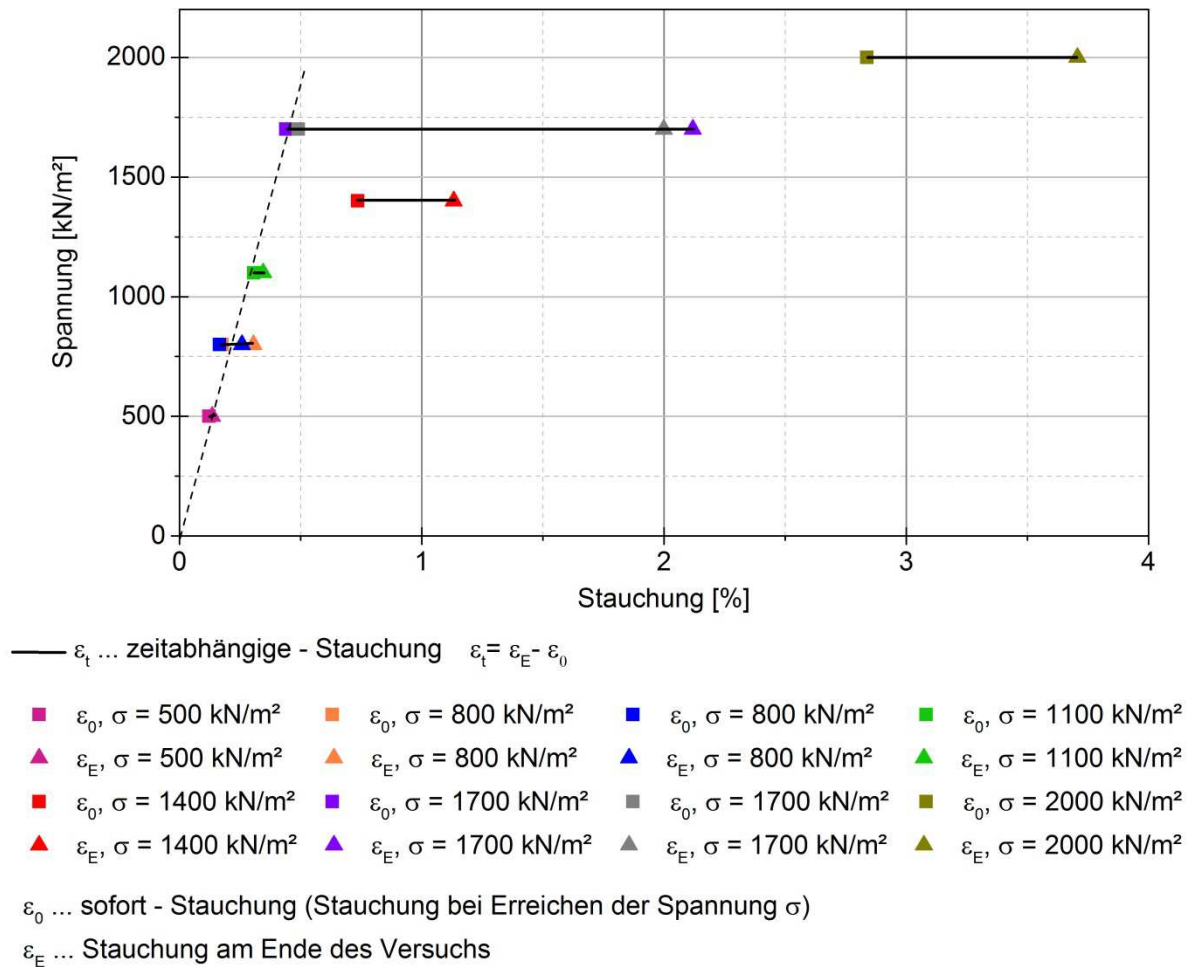


Abbildung 3-29: Zeit- und spannungsabhängiges Materialverhalten dargestellt in Abhängigkeit von den jeweiligen Spannungen von Glasschaumprismen; Materialtyp G170 (2010)

Abbildung 3-29 stellt die Stauchungen  $\epsilon_0$  und die Stauchungen  $\epsilon_E$  je Probe in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma$  dar. Bei den Versuchen mit einer Spannung von  $\sigma = 1700 \text{ kN/m}^2$  traten die größten zeitabhängigen Stauchungen  $\epsilon_t$  auf. Diese Spannung von  $\sigma = 1700 \text{ kN/m}^2$  liegt im Bereich der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Materialtyps G170 (2010) (s. Tabelle 3-8).

Für die Versuche mit einer Spannung von  $\sigma \leq 1100 \text{ kN/m}^2$  traten nahezu keine zeitabhängigen Stauchungen  $\epsilon_t$  auf.

Das zeitabhängige Materialverhalten in Gestalt von Kriechen ist für Spannungen im Bereich der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  am stärksten ausgeprägt und kann auf Schädigungen der Glasschaumprismen zurückgeführt werden. Wo genau diese Schädigungen auftreten bzw. wie sich diese entwickeln, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### 3.2.4 Frostbeständigkeit Einzelkorn

Gemäß der derzeit gültigen Zulassung des deutschen Institutes für Bautechnik (DIBT) gilt das Material als frostsicher (nach vorhergehender Wasserlagerung und nachfolgendem Abtropfvorgang). Eine Überprüfung der Frostbeständigkeit des Einzelkorns bei Lagerung unter Wasser wurde im Zuge des gegenständlichen Forschungsvorhabens durchgeführt.

#### 3.2.4.1 Versuchsdurchführung

Es wurden 2 Versuchsserien durchgeführt. In einer ersten Versuchsserie wurde für die Ermittlung einer etwaigen Schädigung durch Frost-Tauwechsel Glasschaumprismen des Materials G170/2010 hergestellt und in ein Gefäß mit Wasser gelegt, wobei sich die Proben während des Versuchs an der Wasser- bzw. Eisoberfläche befanden. Es wurde nur 1 Frost-Tauwechsel durchgeführt.

Im Zuge der zweiten Versuchsserie wurden die Prismen mit Hilfe eines Netzes unter Wasser gehalten und es wurden 10 Frost-Tauwechsel durchgeführt.

#### 3.2.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Einen Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  bzw. Bruchfestigkeit  $q_u$  der Proben mit und ohne Frost- Tauwechselbeanspruchung hätte das Maß der Schädigung aufzeigen sollen. Aufgrund der ausgeprägten Schäden an den Proben nach der Frost-Tauwechselbeanspruchung war das aber nicht möglich, sodass die Auswertung ausschließlich visuell erfolgen musste.



*Abbildung 3-30: Ein Prisma der ersten Versuchsserie vor (links), während (Mitte) und nach einen Frost- Tauwechsel (rechts)*

Abbildung 3-30 zeigt die massive Schädigung eines an der Oberfläche schwimmenden Prismas nach einem Frost-Tauwechsel.

Bei der zweiten Versuchsserie wurden die Prismen nach 10 Frost-Tauwechseln vollkommen zerstört. (s. Abbildung 3-31 rechts).

Eine Überprüfung der Frostsicherheit des Korngemisches war nicht mehr erforderlich, da bereits das Einzelkorn nicht frostbeständig ist, wie oben gezeigt wurde.





*Abbildung 3-31: Prisma der zweiten Versuchsserie mit Sicherung gegen Aufschwimmen vor (Mitte) und nach 10 Frost- Tauwechsel (rechts)*

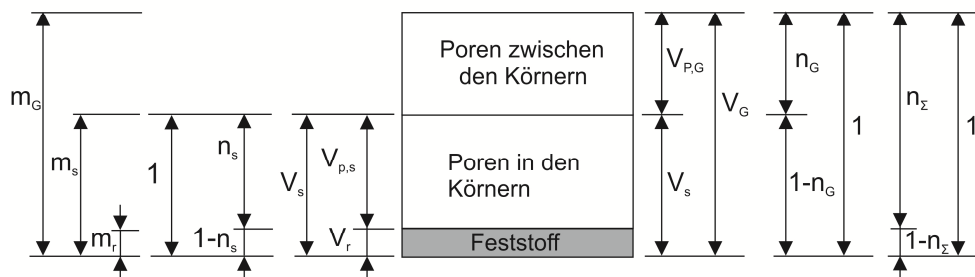
### 3.3 Laboruntersuchungen am Korngemisch

Es wurden folgende Parameter am Korngemisch ermittelt:

- Korngrößenverteilung
- Schüttdichte (= Dichte des geschütteten Korngemisch)
- Trockendichte (= Dichte des Korngemisch nach Verdichtung)
- Steifigkeit
- Scherfestigkeit
- Wasseraufnahmefähigkeit
- Durchlässigkeit

#### 3.3.1 Beschreibung des Korngemischs anhand des Einheitswürfels

##### 3.3.1.1 Korngemisch ohne Verdichtung



|           |                                  |            |                                                                              |
|-----------|----------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $V_r$     | Volumen des Feststoffes (Glas)   | $V_G$      | Volumen des Korngemischs                                                     |
| $V_s$     | Volumen des Einzelkorns          | $V_{P,G}$  | Volumen der Poren zwischen den Körnern                                       |
| $V_{p,s}$ | Volumen der Poren in den Körnern | $m_G$      | Masse des Korngemischs                                                       |
| $m_r$     | Masse des Feststoffes            | $n_G$      | Porenanteil des Korngemischs                                                 |
| $m_s$     | Masse des Einzelkorns (= $m_r$ ) | $n_\Sigma$ | Porenanteil resultierend aus der Summe der Poren in und zwischen den Körnern |
| $n_s$     | Porenanteil des Einzelkorns      |            |                                                                              |

Abbildung 3-32: Vereinfachte Darstellung der Bestandteile des Korngemischs ohne Verdichtung anhand des Einheitswürfels

Die Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  leitet sich aus der trockenen Masse des Korngemischs  $m_G$  und aus dem Volumen des geschütteten Korngemischs  $V_G$  ab. Weitere Informationen zur Bestimmung der Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  sind im Abschnitt 3.3.3 angeführt.

$$\rho_{d,G} = \frac{m_G}{V_G} \quad (3-12)$$

Die Masse der Poren zwischen den Körnern  $V_{p,G}$  und der Poren in den Körnern  $V_{p,s}$  werden zu Null angenommen, somit gilt:

$$m_r = m_s = m_G \quad (3-13)$$

Dem der Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  zugehörige Porenanteil  $n_G$  berechnet sich wie folgt:

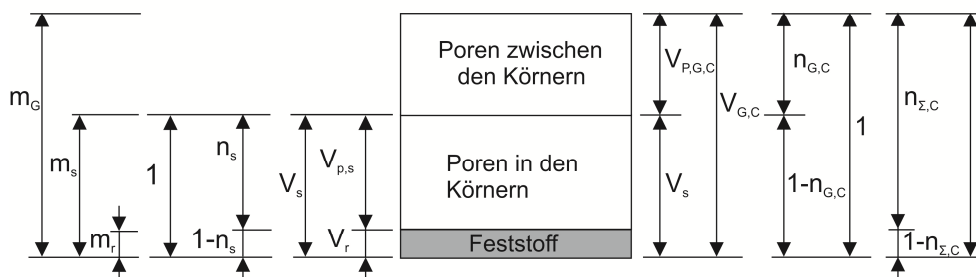
$$n_G = \frac{V_{p,G}}{V_G} = \frac{V_G - V_s}{V_G} = 1 - \frac{V_s}{V_G} = 1 - \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_G}{\rho_{d,G}}} = 1 - \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_s}{\rho_{d,G}}} = 1 - \frac{\rho_{d,G}}{\rho_s} \quad (3-14)$$

Der Porenanteil  $n_G$  beschreibt das Verhältnis der Volumina der Poren zwischen den Körnern  $V_{p,G}$  und des Korngemischs  $V_G$  ohne Berücksichtigung der Poren im Einzelkorn.

Für die Ermittlung des gesamten Porenanteils  $n_\Sigma$  wird das Volumen der Poren zwischen und in den Körnern ( $V_{p,s} + V_{p,G}$ ) auf das Volumen des Korngemischs  $V_G$  bezogen. Die Berechnung des Porenanteils  $n_\Sigma$  erfolgt mit Gleichung (3-15).

$$n_\Sigma = \frac{V_{p,s} + V_{p,G}}{V_G} = \frac{V_G - V_r}{V_G} = 1 - \frac{V_r}{V_G} = 1 - \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_G}{\rho_{d,G}}} = 1 - \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_r}{\rho_{d,G}}} = 1 - \frac{\rho_{d,G}}{\rho_r} \quad (3-15)$$

### 3.3.1.2 Verdichtetes Korngemisch



|                |                                                                                                     |             |                                                         |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| $V_r$          | Volumen des Feststoffes (Glas)                                                                      | $V_{G,C}$   | Volumen des verdichteten Korngemischs                   |
| $V_s$          | Volumen des Einzelkorns                                                                             |             |                                                         |
| $V_{p,s}$      | Volumen der Poren in den Körnern                                                                    | $V_{p,G,C}$ | Volumen der Poren zwischen den Körnern nach Verdichtung |
| $m_r$          | Masse des Feststoffes                                                                               | $m_G$       | Masse des Korngemischs                                  |
| $m_s$          | Masse des Einzelkorns (= $m_r$ )                                                                    | $n_{G,C}$   | Porenanteil des verdichteten Korngemischs               |
| $n_s$          | Porenanteil des Einzelkorns                                                                         |             |                                                         |
| $n_{\Sigma,C}$ | Porenanteil resultierend aus der Summe der Poren in und zwischen den Körnern nach einer Verdichtung |             |                                                         |

Abbildung 3-33: Vereinfachte Darstellung der Bestandteile des Korngemischs mit Verdichtung anhand des Einheitswürfels

GSG-Schichten werden im Zuge der Herstellung verdichtet (s. Abschnitt 3.1). Die Dichte des Korngemischs nach einer Verdichtung C wird im gegenständlichen Bericht als Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  bezeichnet und leitet sich aus der trockenen Masse des Korngemischs  $m_G$  und aus dem Volumen des verdichteten Korngemischs  $V_{G,C}$  ab.

$$\rho_{d,G,C} = \frac{m_G}{V_{G,C}} \quad (3-16)$$

Die Masse der Poren zwischen den Körnern  $V_{P,G}$  und der Poren in den Körnern  $V_{p,s}$  werden zu Null angenommen, somit gilt:

$$m_r = m_s = m_G \quad (3-17)$$

Dem der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  zugehörige Porenanteil  $n_{G,C}$  berechnet sich wie folgt:

$$n_{G,C} = \frac{V_{P,G}}{V_{G,C}} = \frac{V_{G,C} - V_s}{V_{G,C}} = 1 - \frac{V_s}{V_{G,C}} = 1 - \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_G}{\rho_{d,G,C}}} = 1 - \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_s}{\rho_{d,G,C}}} = 1 - \frac{\rho_{d,G,C}}{\rho_s} \quad (3-18)$$

Der Porenanteil  $n_{\Sigma,C}$  nach einer Verdichtung wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$n_{\Sigma} = \frac{V_{p,s} + V_{P,G,C}}{V_{G,C}} = \frac{V_{G,C} - V_r}{V_{G,C}} = 1 - \frac{V_r}{V_{G,C}} = 1 - \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_G}{\rho_{d,G,C}}} = 1 - \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_r}{\rho_{d,G,C}}} = 1 - \frac{\rho_{d,G,C}}{\rho_r} \quad (3-19)$$

### 3.3.2 Korngrößenverteilung im Anlieferungszustand

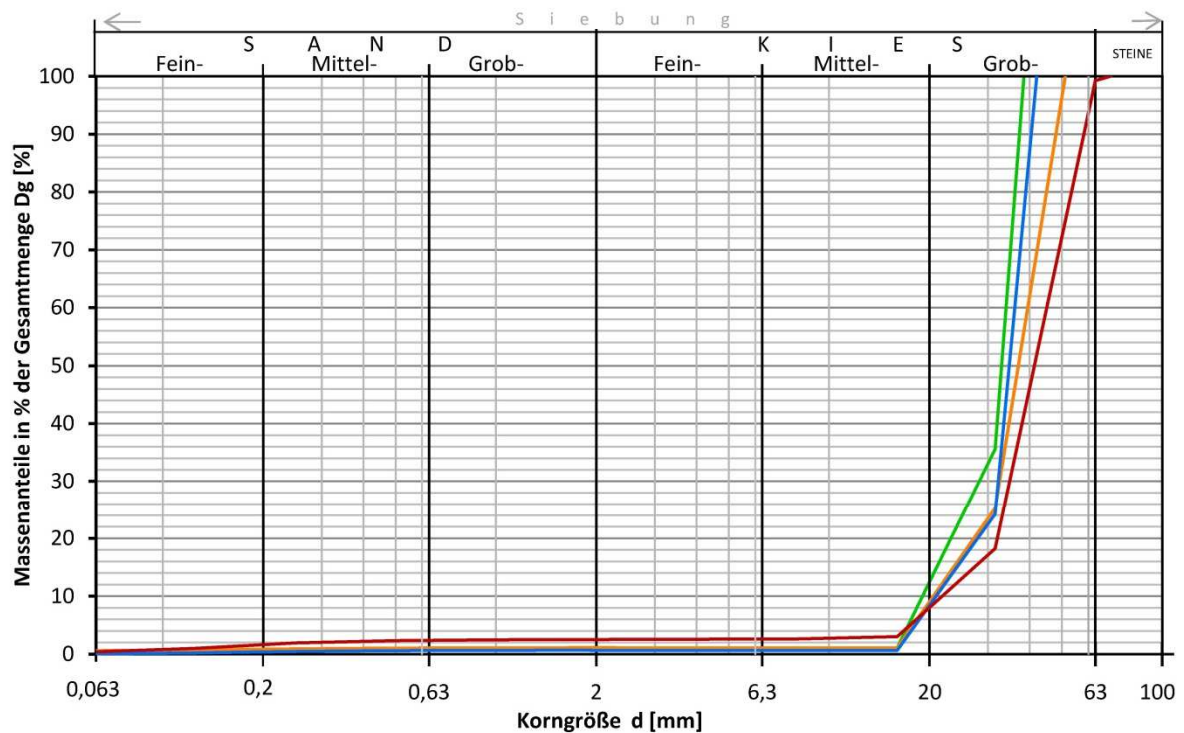
Die Ermittlung der Korngrößenverteilung erfolgte durch Siebung des trockenen Korngemischs.

#### 3.3.2.1 Versuchsdurchführung

Die Korngrößenverteilungslinien der Materialtypen G150 (2011), G170 (2012), G170 (2010) und G210 (2011) wurden direkt nach der Anlieferung des Materials durch Siebung von jeweils ca. 4 kg GSG bestimmt.

#### 3.3.2.2 Auswertung und Ergebnisse

Abbildung 3-34 zeigt die einzelnen Korngrößenverteilungslinien je Materialtyp. Die Korngrößenverteilungslinien der jeweiligen Materialtypen unterscheiden sich kaum voneinander. Bei allen untersuchten Materialtypen liegt gemäß ÖNORM B 4400-1 eine eng gestufte Korngrößenverteilungslinie vor. Die Körner aller Materialtypen besitzen eine kubische Kornform, einen kantigen Rundungsgrad und eine raue Oberfläche.



| <i>G150 (2011)</i> —               | <i>G170 (2012)</i> —               | <i>G170 (2010)</i> —               | <i>G210 (2011)</i> —               |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $C_u = 1,7$                        | $C_u = 1,9$                        | $C_u = 2,1$                        | $C_u = 1,8$                        |
| $C_c = 1,37$                       | $C_c = 1,30$                       | $C_c = 1,23$                       | $C_c = 1,23$                       |
| Grobfaktor = 269,7 cm <sup>2</sup> | Grobfaktor = 271,6 cm <sup>2</sup> | Grobfaktor = 274,1 cm <sup>2</sup> | Grobfaktor = 265,4 cm <sup>2</sup> |

$C_u$  Ungleichförmigkeitszahl

$C_c$  Krümmungszahl

Abbildung 3-34: Korngrößenverteilungslinien der untersuchten Materialtypen

### 3.3.3 Ermittlung der Schüttdichte $\rho_{d,G}$ und des zugehörigen Porenanteils $n_s$

Die Ermittlung der Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  der Materialtypen G150 (2011), G170 (2010), G170 (2012) und G210 (2011) erfolgte gemäß ÖN EN 1097-3.

#### 3.3.3.1 Versuchsdurchführung

Es wurden folgende Messgefäße verwendet:

- Proctortopf: Durchmesser = 25 cm, Höhe = 20 cm,  $V_M = 9,81$  Liter
- Großscherrahmen: Seitenlängen = 50 x 50 cm, Höhe = 20 cm,  $V_M = 50$  Liter

mit:

$V_M$  Volumen des jeweiligen Messgefäßes

#### 3.3.3.2 Auswertung und Ergebnisse

Zunächst wurden die Massen der leeren Messgefäße  $m_1$  bestimmt. Anschließend wurden die Messgefäße mit dem Korngemisch des jeweiligen Materialtyps gefüllt, die Probenoberfläche geglättet und die Massen der gefüllten Messgefäße  $m_2$  ermittelt. Die Berechnung der

Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  erfolgt nach Gleichung (3-20), wobei das Volumen des Messgefäßes  $V_M$  dem Volumen des Korngemischs  $V_G$  entspricht.

$$\rho_{d,G} = \frac{m_2 - m_1}{V_M} = \frac{m_G}{V_G} \quad (3-20)$$

Vergleicht man die in Tabelle 3-10 angeführten Schüttdichten  $\rho_{d,G}$  der untersuchten Materialtypen untereinander, so ist kein signifikanter Unterschied erkennbar. Ebenso sind die Porenanteile  $n_G$  und  $n_\Sigma$  der jeweiligen Materialtypen nahezu identisch, was auf die geringen Unterschiede der Kornverteilungslinien der Materialtypen zurückgeführt werden kann.

Die Schüttdichten  $\rho_{d,G}$  der Proben im Proctortopf unterscheiden sich kaum von den Schüttdichten  $\rho_{d,G}$  der Proben im Großscherrahmen. Somit führt das im Vergleich zum Proctortopf größere Volumen des Großscherrahmens praktisch zu keiner Änderung in den Ergebnissen der Schüttdichte  $\rho_{d,G}$ . n summe erwähnen

Weiters zeigt sich, dass die für die Materialtypen ermittelten Schüttdichten  $\rho_{d,G}$  mit den Angaben des Herstellers nicht übereinstimmen (s. Tabelle 3-1).

*Tabelle 3-10: Schüttdichte  $\rho_{d,G}$ , zugehöriger Porenanteil  $n_G$  und  $n_\Sigma$  je Materialtyp und Messgefäß*

| Messgefäß            |                                   | Materialtyp |             |             |             |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                      |                                   | G150 (2011) | G170 (2012) | G170 (2010) | G210 (2011) |
| Proctortopf          | $\rho_{d,G}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,137       | 0,147       | 0,155       | 0,146       |
|                      | $n_G$ [-]                         | 0,45        | 0,43        | 0,45        | 0,47        |
|                      | $n_\Sigma$ [-]                    | 0,95        | 0,94        | 0,94        | 0,94        |
| Großscher-<br>rahmen | $\rho_{d,G}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,132       | 0,151       | -           | 0,138       |
|                      | $n_G$ [-]                         | 0,47        | 0,42        | -           | 0,50        |
|                      | $n_\Sigma$ [-]                    | 0,95        | 0,94        | -           | 0,94        |

### 3.3.4 Kompressionsversuche - Oedometerquerschnitt Ø250 mm – Kurzzeitversuch

Die im gegenständlichen Forschungsvorhaben durchgeführten Kompressionsversuche dienen zur Untersuchung des Last-Verformungsverhalten von GSG-Schichten. Die in diesem Kapitel beschriebenen Kompressionsversuche orientieren sich hinsichtlich der Laststeigerung an den Versuchen, durchgeführt an der Universität Innsbruck (s. Abschnitt 3.4).

#### 3.3.4.1 Versuchsdurchführung

Für die Herstellung der Proben wurden die Korngemische der Materialtypen G150 (2011), G170 (2012), G170 (2010) und G210 (2011) in einem Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm (= Oedometer Ø250 mm), mit einer Höhe von 200 mm geschüttet und die Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  bestimmt (s. 3.3.3). Anschließend wurde eine Stahlplatte mit einem

Durchmesser von 248 mm und einer Höhe von 20 mm auf die Proben gelegt. Auf der Stahlplatte wurden Stöße mit einem Proctorhammer ausgeführt, welche zu einer Verdichtung der Proben führten. In Abhängigkeit von der Verdichtung C wurden Proctorhämmer mit einer Fallmasse von 2,5 kg und 4,5 kg verwendet, wobei der Proctorhammer mit einer Fallmasse von 2,5 kg für Verdichtungen von  $C = 10\%$  und  $15\%$  und der Proctorhammer mit einer Fallmasse von 4,5 kg für Verdichtungen von  $C = 20\% \div 30\%$  angewendet wurde. Zur Ermittlung des Einflusses der Verdichtung C auf die Steifigkeit der Proben wurden Versuche mit unterschiedlich verdichteten Proben durchgeführt, wobei die Verdichtung im Bereich von  $C = 0\% \div 30\%$  variiert wurde. Während der Verdichtung der Proben wurde auf die Planparallelität der Proben geachtet.

Der Verlauf der Spannungen während der Kurzzeit-Kompressionsversuche ist in Abbildung 3-35 dargestellt. Die Belastung der Proben besteht aus 8 Lastzyklen. Die Steigerung der Spannung innerhalb der Lastzyklen erfolgte mit einer konstanten Rate von  $350 \text{ kN/m}^2$  je Minute. Die jeweiligen Spannungsmaxima der Lastzyklen betrugen  $100 \text{ kN/m}^2$ ,  $200 \text{ kN/m}^2$ ,  $300 \text{ kN/m}^2$ ,  $400 \text{ kN/m}^2$ ,  $500 \text{ kN/m}^2$ ,  $600 \text{ kN/m}^2$ ,  $700 \text{ kN/m}^2$  und  $800 \text{ kN/m}^2$ . Nach Erreichen des Spannungsmaximums im jeweiligen Lastzyklus wurde die Spannung mit einer Rate von  $350 \text{ kN/m}^2$  je Minute jeweils wieder auf  $10 \text{ kN/m}^2$  entlastet.

Labor: TU Wien

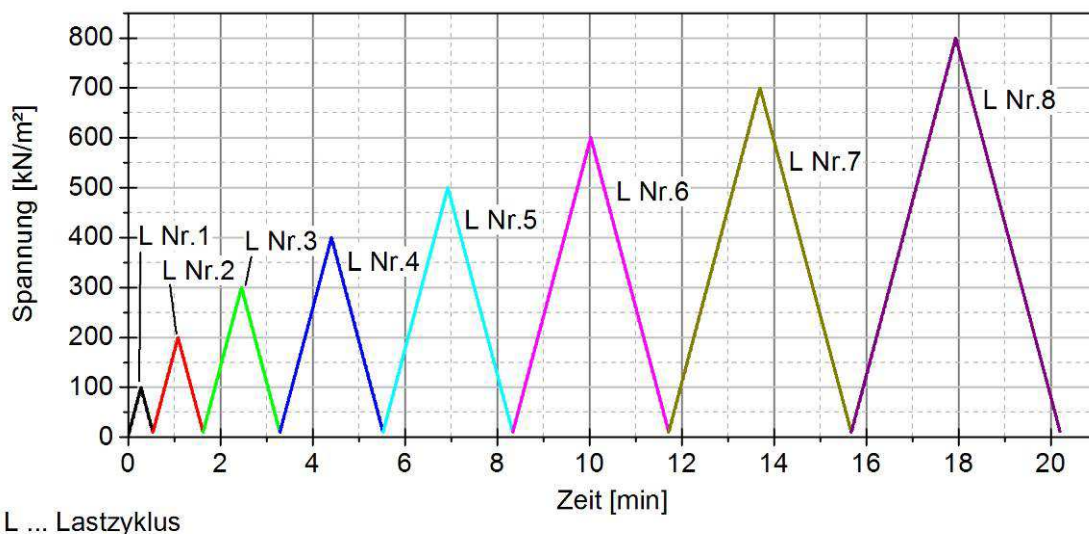


Abbildung 3-35: Belastungsverlauf Kurzzeit-Kompressionsversuch

### 3.3.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Im Zuge der Kurzzeit-Kompressionsversuche wurden die Verschiebungen des Laststempels und die am Laststempel aufgebrachte Kraft gemessen und somit das Last-Verformungsverhalten der Proben ermittelt. Auf Basis dieser beiden Größen können die Steifemoduln der Proben in Abhängigkeit vom jeweiligen Lastniveau für die Erstbelastung ( $E_{S1}$ ), der Entlastung und der Wiederbelastung ( $E_{S2}$ ) berechnet werden. Exemplarisch wird die Ermittlung des Steifemoduls der Erst- und Wiederbelastungen für einen Versuch mit 8 Lastzyklen mit dem Material des Typs G170 (2010) und einer Verdichtung von  $C = 25\%$  im Folgenden im Detail beschrieben (s. Abbildung 3-36; Tabelle 3-11 bis Tabelle 3-13).



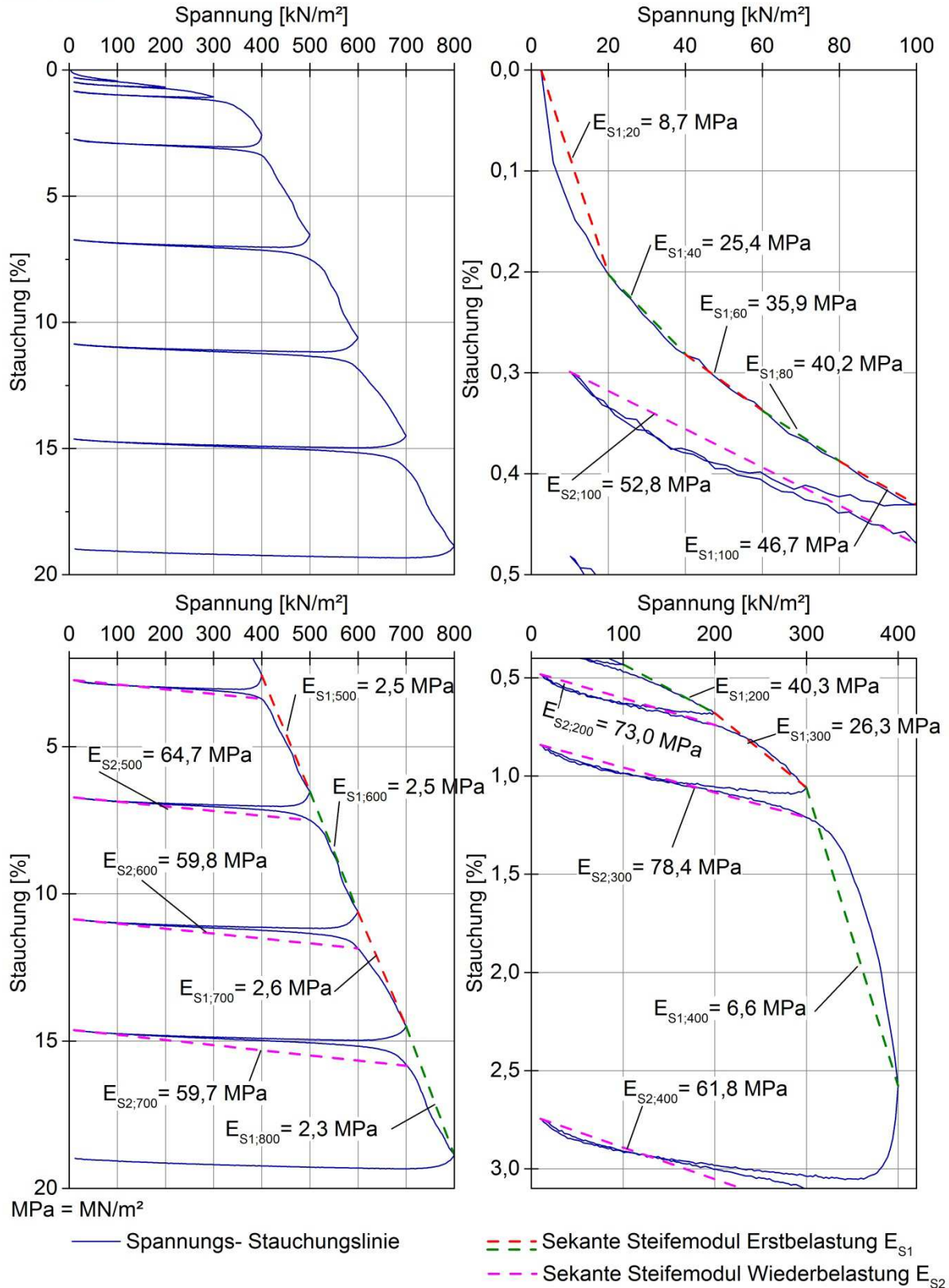


Abbildung 3-36: Bestimmung der Steifemoduln; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010)

Im Zuge der Laststeigerung innerhalb des ersten Lastzyklus wurden 5 Steifemoduln ermittelt (s. Abbildung 3-36 bzw. Tabelle 3-11), welche sich als Sekantenmodul aus dem Last-



Verformungsverhalten der Spannungsbereiche  $\sigma = 3 \div 20 \text{ kN/m}^2$ ,  $\sigma = 20 \div 40 \text{ kN/m}^2$ ,  $\sigma = 40 \div 60 \text{ kN/m}^2$ ,  $\sigma = 60 \div 80 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma = 80 \div 100 \text{ kN/m}^2$  ableiten. Exemplarisch wird in Gleichung (3-21) die Berechnung des Steifemoduls  $E_{S1,20}$  dargestellt.

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \xrightarrow{\text{z.B.}} E_{S1,20} = \frac{20,159 - 2,507}{0,002032 - 0,0000} = 8687 \text{ kN/m}^2 \hat{=} 8,7 \text{ MN/m}^2 \quad (3-21)$$

*Tabelle 3-11: Steifemoduln der Erstbelastung des ersten Lastzyklus; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010);*

|               |                      |      |                    |                     |                     |                     |                      |
|---------------|----------------------|------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| $\sigma$      | [kN/m <sup>2</sup> ] | 3    | 20                 | 40                  | 60                  | 80                  | 100                  |
| $\varepsilon$ | [%]                  | 0,00 | 0,20               | 0,28                | 0,34                | 0,39                | 0,43                 |
| L             |                      | 1    |                    |                     |                     |                     |                      |
| $E_s$         | [MN/m <sup>2</sup> ] |      | $E_{S1,20}$<br>8,7 | $E_{S1,40}$<br>25,4 | $E_{S1,60}$<br>35,9 | $E_{S1,80}$<br>40,2 | $E_{S1,100}$<br>46,7 |

$\sigma$  Normalspannung

$\varepsilon$  Stauchung

L Lastzyklus

$E_s$  Steifemodul als Sekante

Die Steifemoduln  $E_{S1}$  für die Spannungen von  $\sigma = 100 \div 800 \text{ kN/m}^2$  wurde als Sekante zwischen den Spannungsmaxima zweier benachbarter Lastzyklen und den zugehörigen Stauchungen berechnet (s. Tabelle 3-12 bzw. Abbildung 3-36).

*Tabelle 3-12: Steifemoduln der Erstbelastung der Lastzyklen 2 ÷ 8; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010);*

|               |                      |      |                      |                      |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------|----------------------|------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\sigma$      | [kN/m <sup>2</sup> ] | 100  | 200                  | 300                  | 400                 | 500                 | 600                 | 700                 | 800                 |
| $\varepsilon$ | [%]                  | 0,43 | 0,47                 | 0,74                 | 1,21                | 3,38                | 7,48                | 11,85               | 15,78               |
| L             |                      | 1    | 2                    | 3                    | 4                   | 5                   | 6                   | 7                   | 8                   |
| $E_s$         | [MN/m <sup>2</sup> ] |      | $E_{S1,200}$<br>40,3 | $E_{S1,300}$<br>26,3 | $E_{S1,400}$<br>6,6 | $E_{S1,500}$<br>2,5 | $E_{S1,600}$<br>2,5 | $E_{S1,700}$<br>2,6 | $E_{S1,800}$<br>2,3 |

$\sigma$  Normalspannung

$\varepsilon$  Stauchung

L Lastzyklus

$E_s$  Steifemodul als Sekante

Die in Tabelle 3-11 und Tabelle 3-12 ermittelten Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  sind in Abhängigkeit von der Spannung in Abbildung 3-37 dargestellt.

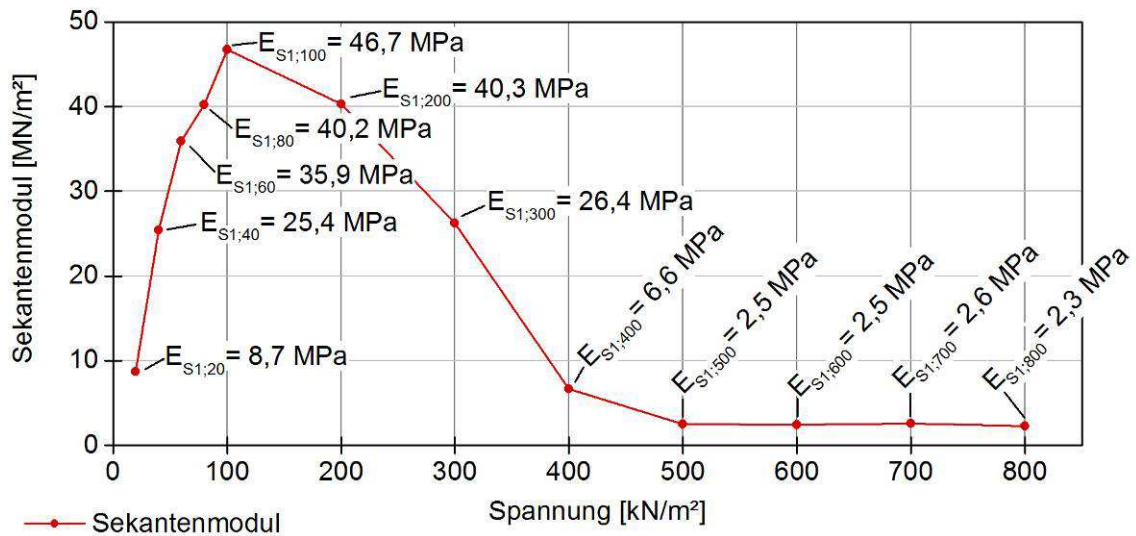


Abbildung 3-37: Steifemoduln der Erstbelastung in Abhängigkeit von der Spannung;  
Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250$  mm; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp:  
G170 (2010);

Zu Beginn des Versuchs steigt der Steifemodul stark an und erreicht bei einer Spannung von  $\sigma = 100$  kN/m<sup>2</sup> ein Maximum. Danach fällt der Steifemodul ab und ist ab einer Spannung von  $\sigma = 500$  kN/m<sup>2</sup> nahezu konstant.

Der Anstieg des Steifemoduls  $E_{S1}$  zu Beginn der Versuche wird auf Folgendes zurückgeführt:

- die Verdichtung C
- das Spannungs-Stauchungsverhalten des Einzelkorns (s. Abbildung 3-7)
- den wachsenden Formschluss zwischen den Körnern (= Kornverspannung) im Zuge der Laststeigerung
- den verbesserten Formschluss zwischen dem Laststempel der Presse und der Oberseite der Probe im Zuge der Laststeigerung

Der Abfall des Steifemoduls  $E_{S1}$  kann auf

- die Überschreitung der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  in den Kontaktflächen zwischen den Körnern und somit auf das Spannungs-Stauchungsverhalten des Einzelkorns (s. Abbildung 3-7)

zurückgeführt werden.

Die Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  leiten sich aus dem Last- Verformungsverhalten der Proben innerhalb der Lastzyklen 2 ÷ 7 ab (s. Tabelle 3-13 bzw. Abbildung 3-36).

*Tabelle 3-13: Seifemoduln der Wiederbelastung der Lastzyklen 2 ÷ 8; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250$  mm; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010);*

|               |                      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |       |                      |       |
|---------------|----------------------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| $\sigma$      | [kN/m <sup>2</sup> ] | 10                   | 100  | 10                   | 200  | 10                   | 300  | 10                   | 400  | 10                   | 500  | 10                   | 600   | 10                   | 700   |
| $\varepsilon$ | [%]                  | 0,30                 | 0,47 | 0,48                 | 0,74 | 0,84                 | 1,21 | 2,75                 | 3,38 | 6,73                 | 7,48 | 10,86                | 11,85 | 14,62                | 15,78 |
| L             |                      | 2                    |      | 3                    |      | 4                    |      | 5                    |      | 6                    |      | 7                    |       | 8                    |       |
| $E_s$         | [MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{S2;100}$<br>52,8 |      | $E_{S2;200}$<br>73,0 |      | $E_{S2;300}$<br>78,4 |      | $E_{S2;400}$<br>61,8 |      | $E_{S2;500}$<br>64,7 |      | $E_{S2;600}$<br>59,8 |       | $E_{S2;700}$<br>59,7 |       |

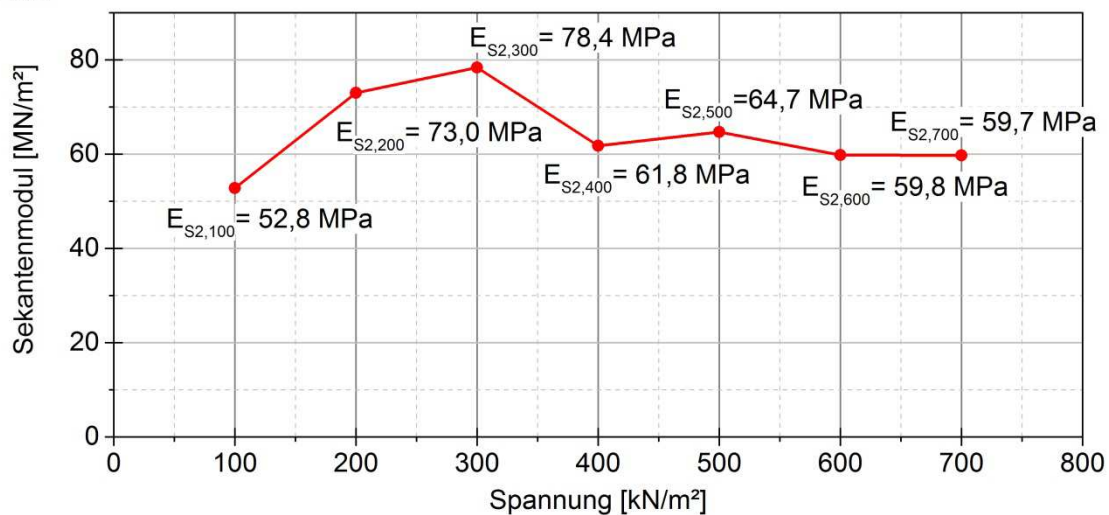
$\sigma$  Normalspannung

$\varepsilon$  Stauchung

L Lastzyklus

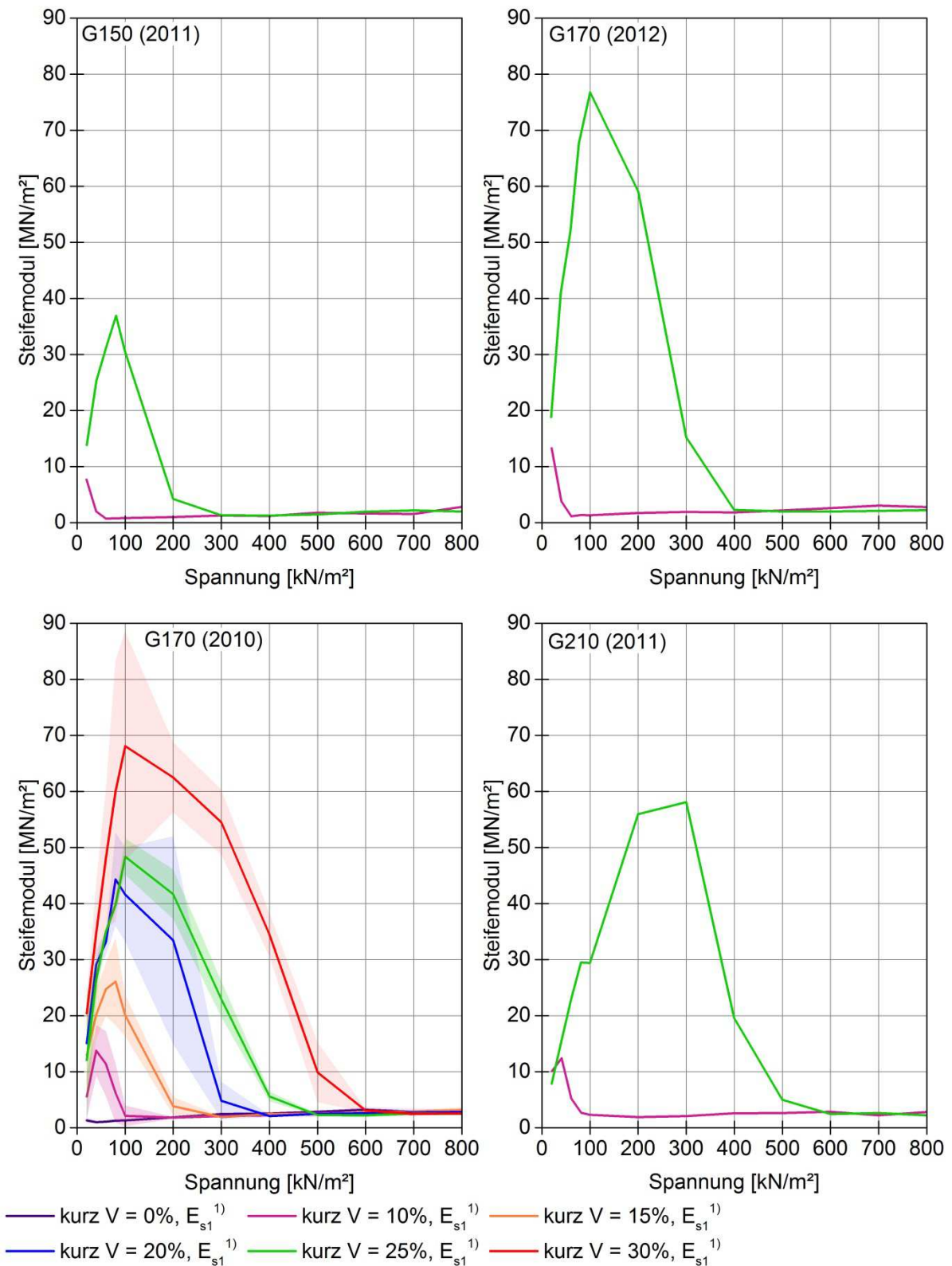
$E_s$  Steifemodul als Sekante

Labor: TUW



*Abbildung 3-38: Steifemoduln der Wiederbelastung in Abhängigkeit von der Spannung; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250$  mm; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010);*

Basierend auf den durchgeführten Kurzzeit-Kompressionsversuchen zeigt Abbildung 3-39 den Verlauf der Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  der Proben im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm für eine Verdichtung von  $C = 10\%$  bis  $30\%$  je Materialtyp. Die Darstellung der Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  erfolgt für alle durchgeführten Versuche nach dem in Abbildung 3-37 und Abbildung 3-38 dargestellten Schema.



<sup>1)</sup> G170 (2010) Mittelwert aus 3 Versuchen; G150 (2011), G170 (2012), G210 (2011) Einzelversuche

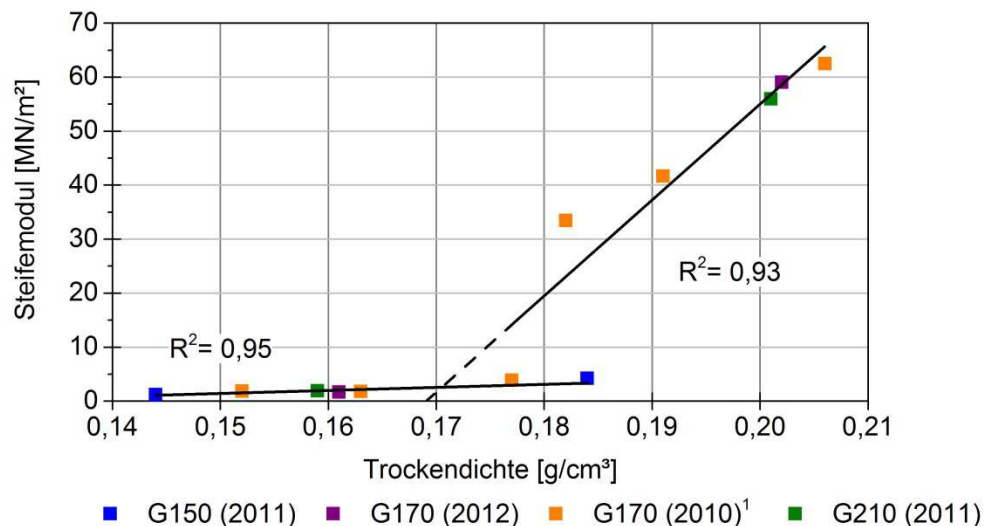
Abbildung 3-39: Verlauf der Steifemoduln der Erstbelastung je Materialtyp und Verdichtung; Oedometerquerschnitt:  $\phi$ 250 mm; Belastung: Kurzzeitversuch

Aus den Verläufen der Steifemoduln  $E_{S1}$  der Abbildung 3-39 können folgende Aussagen getroffen werden:

- Für den Steifemodul  $E_{S1}$  ist das Maß der Verdichtung  $C$  von maßgebender Bedeutung. Zuzufolge einer höheren Verdichtung  $C$  resultiert ein höherer Steifemodul  $E_{S1}$ .
- Der Steifemodul  $E_{S1}$  ist grundsätzlich von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  abhängig, jedoch zeigt sich, dass der Einfluss der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  auf den Steifemodul  $E_{S1}$  bei den durchgeführten Kurzzeit-Kompressionsversuchen innerhalb der Bandbreite der Streuung der Versuchsergebnisse liegt.

Abbildung 3-40 zeigt den Zusammenhang zwischen der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  und dem Steifemodul  $E_{S1,200}$ . Ab einer Trockendichte  $\rho_{d,G,C} = 0,17 \text{ g/cm}^3$  kommt es zum Anstieg der Steifemoduln  $E_{S1,200}$ .

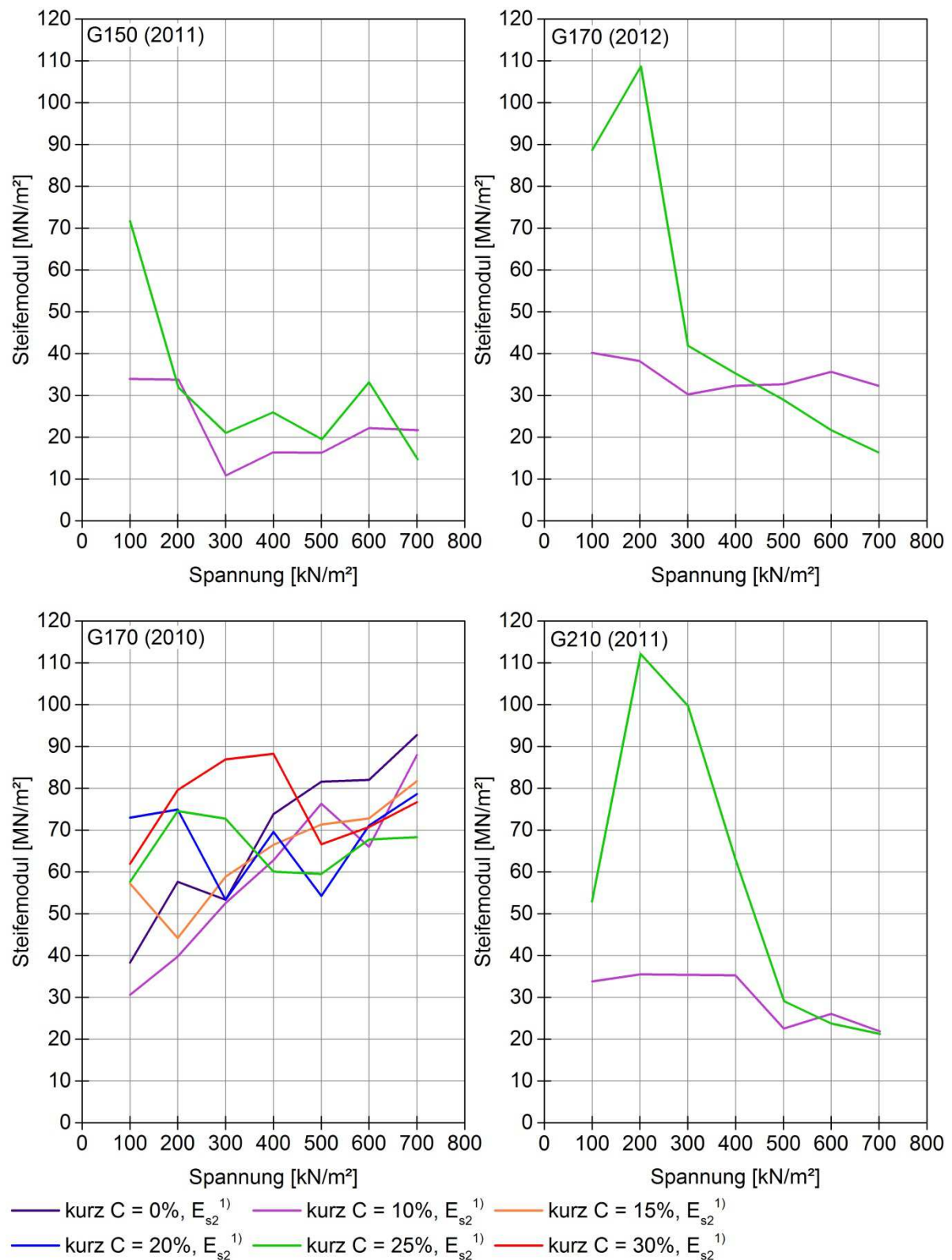
Trockendichte - Steifemodul  $E_{S1,200}$ , Kurzzeitvers., Oedometerquerschnitt  $\phi 250 \text{ mm}$ ,  $C = 0 - 30\%$   
Labor: TU Wien



<sup>1</sup> Mittelwert aus 3 Einzelversuchen

Abbildung 3-40: Steifemodul  $E_{S1,200}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$ ; Oedometerquerschnitt:  $\phi 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch

Abbildung 3-41 zeigt die Verläufe der Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$ . Korrelierbare Zusammenhänge zwischen den Steifemoduln  $E_{S2}$  und der Verdichtung  $C$  sowie der Materialeigenschaften sind nicht erkennbar.



<sup>1)</sup> G170 (2010) Mittelwert aus 3 Versuchen; G150 (2011), G170 (2012), G210 (2011) Einzelversuche

Abbildung 3-41: Verläufe der Steifemoduln der Wiederbelastung je Materialtyp und Verdichtung; Oedometerquerschnitt:  $\phi$ 250 mm; Belastung: Kurzzeitversuch



### 3.3.5 Ermittlung der Kornverfeinerungen der Proben zufolge der Verdichtung und während der Laststeigerung im Zuge der Kurzzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm

Während der Kurzzeit-Kompressionsversuche im Oedometer  $\varnothing 250$  mm kam es zur Verfeinerung des Korngemisches der Proben. Die Kornverfeinerungen zufolge der Verdichtung und während der Laststeigerung im Zuge des Kurzzeit-Kompressionsversuches werden im Folgenden beschrieben.

Die Versuche wurden mit dem Materialtyp G170 (2010) durchgeführt. Die Beurteilung der Kornverfeinerung der Proben durch die Beanspruchungen (Verdichtung, Kurzzeit-Kompressionsversuch) erfolgt durch einen Vergleich der Korngrößenverteilungslinien (= Sieblinie) der Proben vor und nach den Beanspruchungen. Um vor den Versuchen Abweichungen des Ausgangsmaterials hinsichtlich der Sieblinie auszuschließen, wurde die Sieblinien der Proben vor jedem Versuch entsprechend adaptiert. Abbildung 3-42 zeigt die Sieblinie des Ausgangsmaterials (rote Linie) und die adaptierte Sieblinie der Proben, mit welcher die Untersuchungen zur Kornverfeinerung durchgeführt worden sind (schwarze Linie).

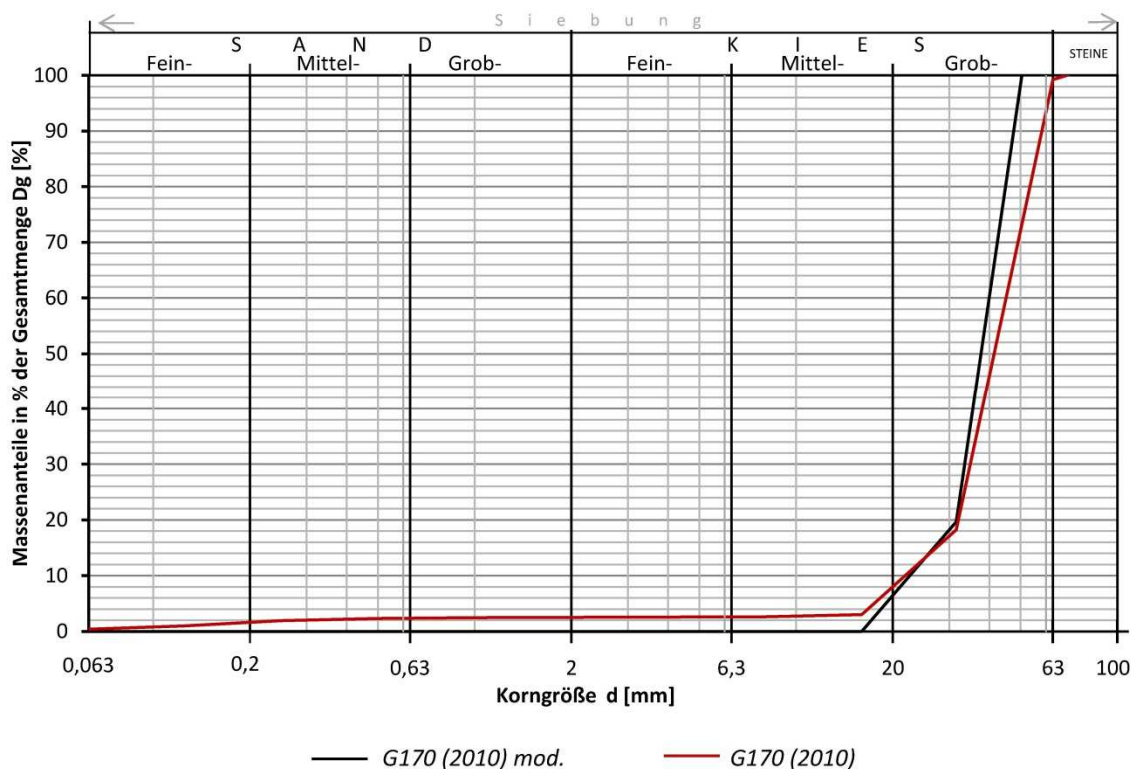


Abbildung 3-42: Sieblinie des Ausgangsmaterials (rote Linie) und jene der Proben zur Ermittlung der Kornverfeinerung (schwarze Linie)

#### 3.3.5.1 Versuchsdurchführung

Die Proben wurden in einem Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm und einer Höhe von 200 mm geschüttet und wie bereits im Kapitel 3.3.4 beschrieben verdichtet, wobei je Verdichtung ( $C = 10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$ ,  $25\%$  und  $30\%$ ) die folgenden Versuche durchgeführt wurden.

An einer Probe je Verdichtung C wurde die Sieblinie unmittelbar nach der Verdichtung C ermittelt.

Je Verdichtung C wurde eine Probe mit jener Spannung im Zuge des Kurzzeit-Kompressionsversuchs belastet, bei welcher der maximale Steifemodul  $E_{S1}$  auftritt. Nach Erreichen dieser Spannung wurden die Kurzzeit-Kompressionsversuche beendet und die Sieblinie dieser Probe bestimmt.

Je Verdichtung C wurde eine Probe mit jener Spannung im Zuge des Kurzzeit-Kompressionsversuchs belastet, ab welcher sich der Steifemodul  $E_{S1}$  nicht mehr signifikant ändert. Nach Erreichen dieser Spannung wurde der Kurzzeit-Kompressionsversuch beendet und die Sieblinie dieser Probe bestimmt.

Mit der vierten Probe je Verdichtung C wurde ein vollständiger Kurzzeit-Kompressionsversuch (8 Lastzyklen) durchgeführt und danach die Sieblinie der Probe ermittelt.

### **3.3.5.2 Auswertung und Ergebnisse**

Die Beurteilung der Kornverfeinerung der Proben im Zuge der Verdichtung und während des Kurzzeit-Kompressionsversuchs erfolgt durch einen Vergleich der Sieblinien und der zugehörigen Grobfaktoren vor und nach den Beanspruchungen.

Der Grobfaktor [ $\text{cm}^2$ ] leitet sich aus der halblogarithmischen Darstellung der Sieblinie ab und entspricht jener Fläche, welche oberhalb der Sieblinie bis zur Abszissenparallelen durch 100 Gewichtsprozent Siebdurchgang eingeschlossen wird. Weiters werden für die Ermittlung des Grobfaktors Körner mit einem Durchmesser  $< 0,063 \text{ mm}$  nicht berücksichtigt. Eine Dekade auf der Abszisse wird mit 10 cm in Rechnung gestellt und auf der Ordinate entsprechen jeweils 10 Gewichts% der Gesamtmenge 1 cm.



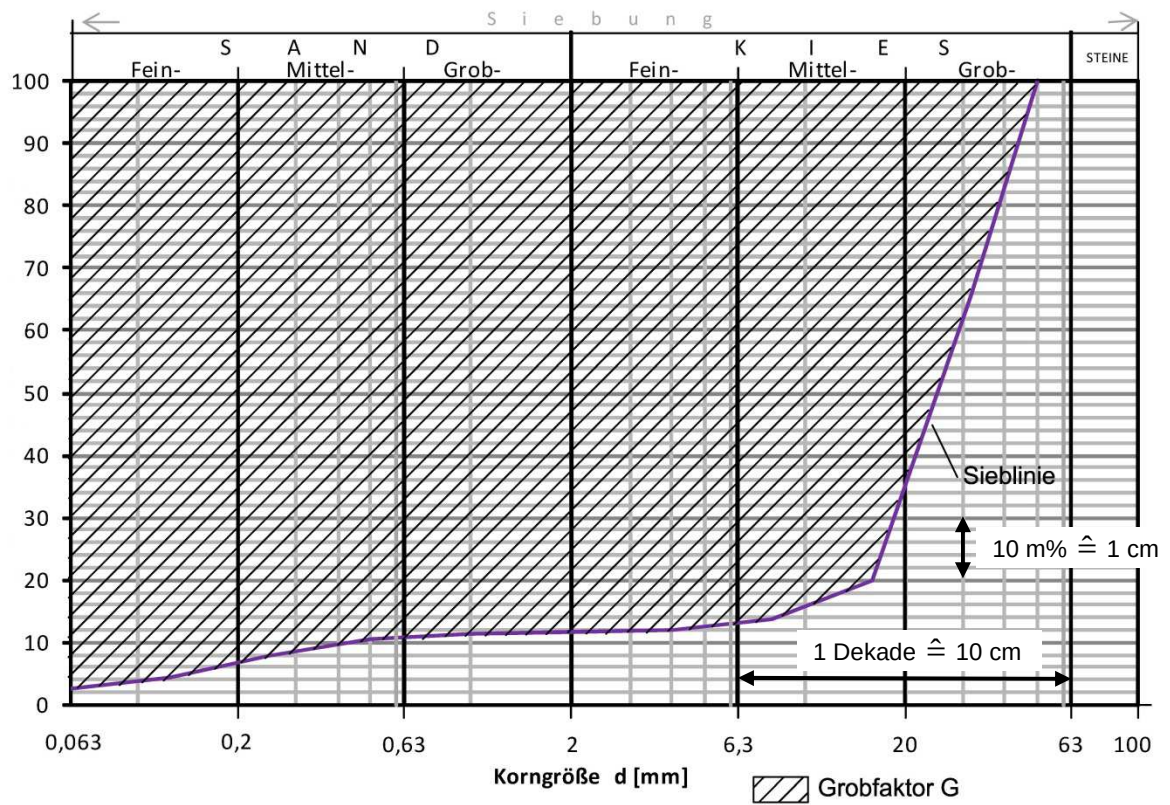


Abbildung 3-43: Definition des Grobfaktors  $G$

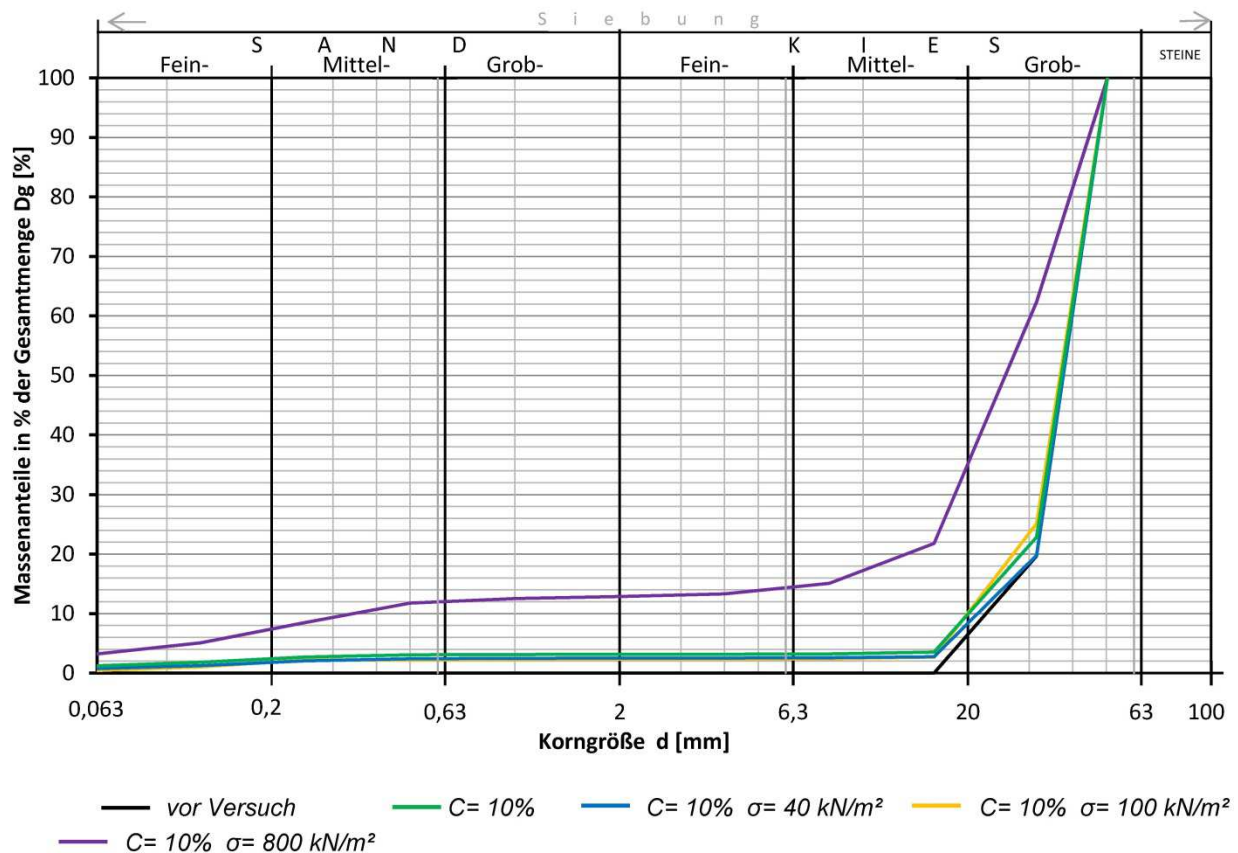
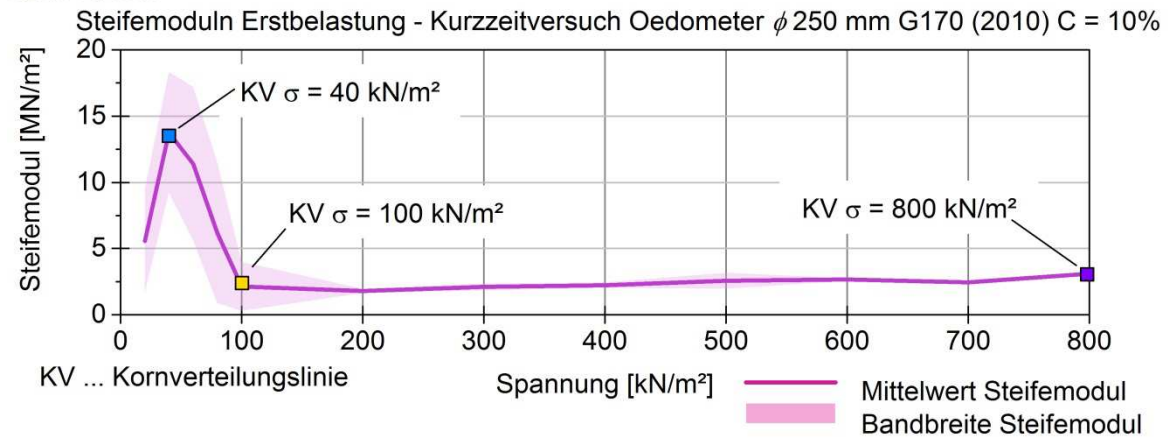


Abbildung 3-44: Oben: Verlauf des Steifemoduls  $E_{s1}$ ; Unten: Kornverteilungslinien nach definierten Beanspruchungen; Oedometerquerschnitt:  $\phi 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 10%; Materialtyp: G170 (2010)

Tabelle 3-14: Grobfaktor je Sieblinie für Materialtyp G170 (2010)

| Sieblinie                         | vor Versuch (modifiziert) | C = 10%             | $\sigma = 40 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Grobfaktor                        | 275,2 $\text{cm}^2$       | 267,1 $\text{cm}^2$ | 270,2 $\text{cm}^2$          | 268,5 $\text{cm}^2$           | 233,8 $\text{cm}^2$           |
| $\Delta$ Grobfaktor <sup>1)</sup> | 0,0%                      | 2,9%                | 1,8%                         | 2,4%                          | 15,0%                         |

<sup>1)</sup> Unterschied in % bezogen auf den Grobfaktor des Ausgangsmaterials

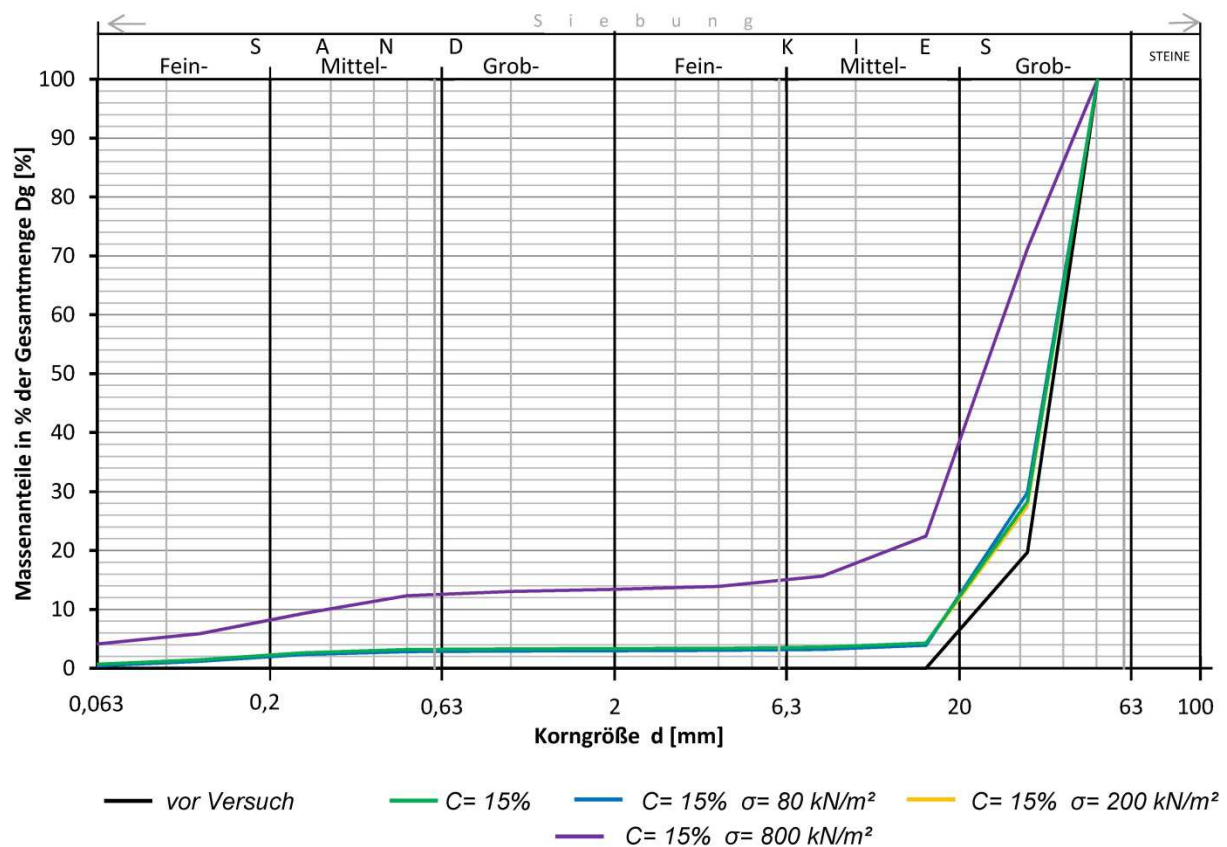
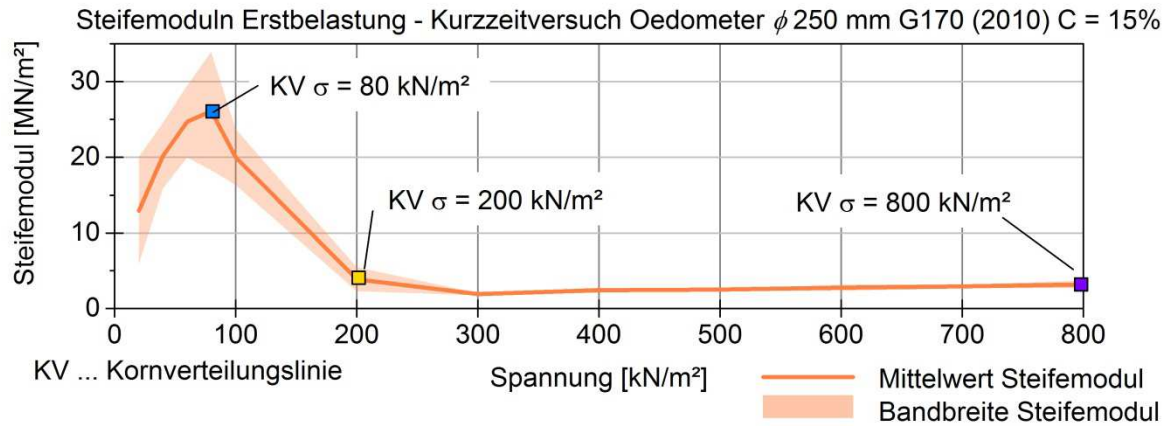


Abbildung 3-45: Oben: Verlauf des Steifemoduls  $E_{S1}$ ; Unten: Kornverteilungslinien nach definierten Beanspruchungen; Oedometerquerschnitt:  $\phi 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 15%; Materialtyp: G170 (2010)

Tabelle 3-15: Grobfaktor je Sieblinie für Materialtyp G170 (2010)

| Sieblinie                         | vor Versuch (modifiziert) | C = 15%             | $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Grobfaktor                        | 275,2 $\text{cm}^2$       | 265,4 $\text{cm}^2$ | 265,9 $\text{cm}^2$          | 265,9 $\text{cm}^2$           | 229,9 $\text{cm}^2$           |
| $\Delta$ Grobfaktor <sup>1)</sup> | 0,0%                      | 3,6%                | 3,4%                         | 3,4%                          | 16,5%                         |

<sup>1)</sup> Unterschied in % bezogen auf den Grobfaktor des Ausgangsmaterials

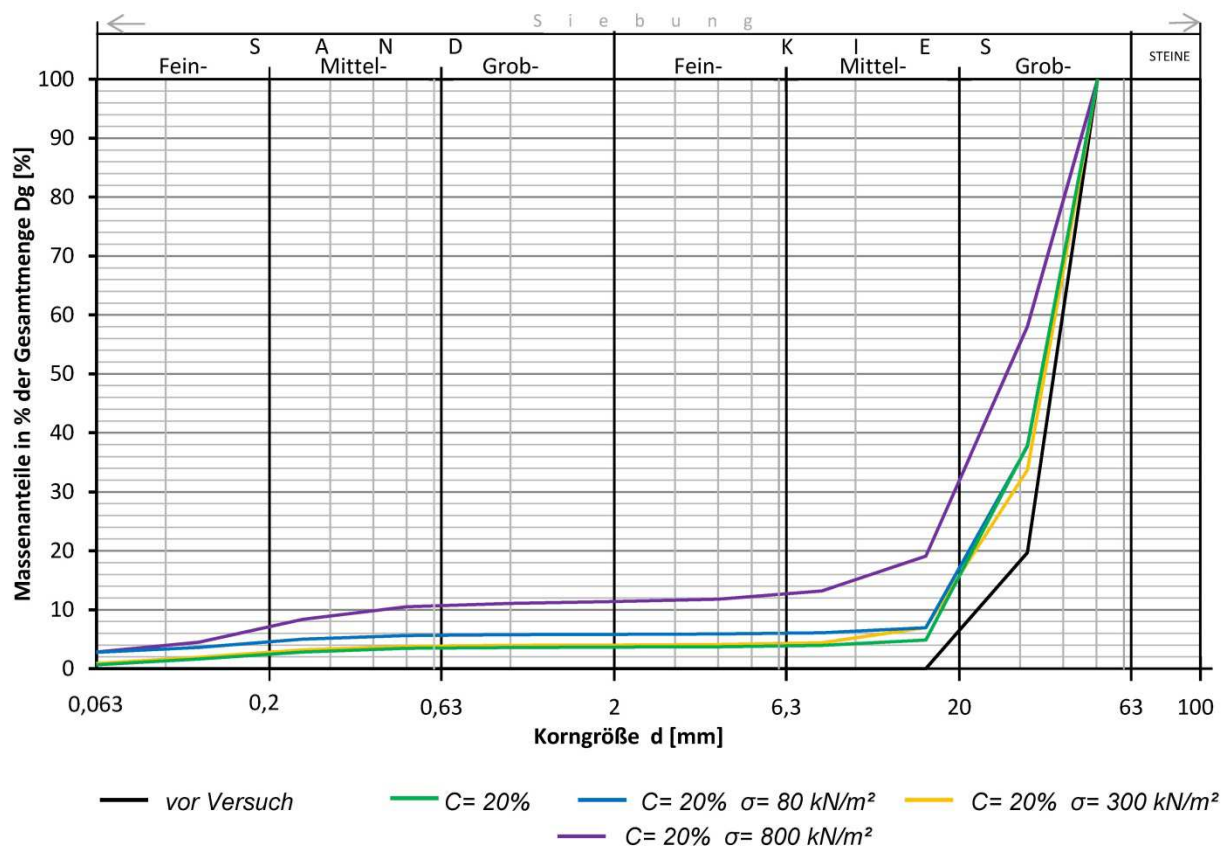
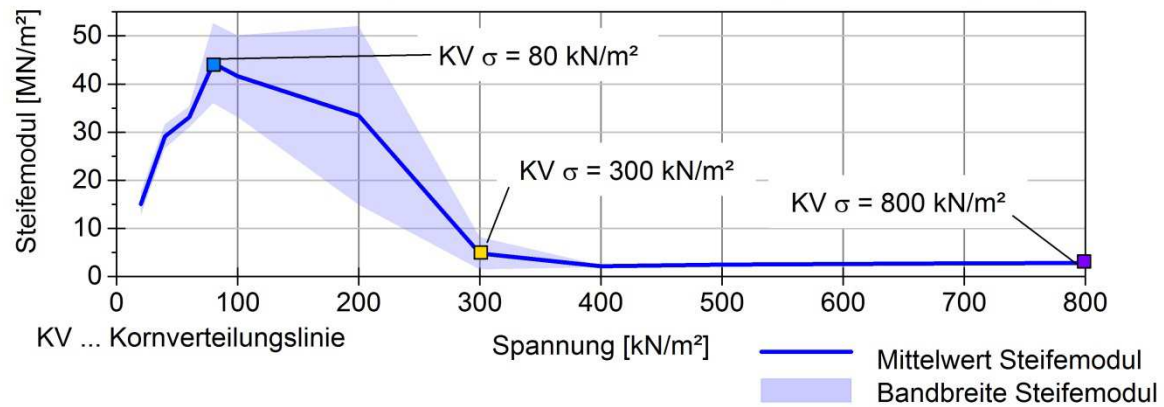
Steifemoduln Erstbelastung - Kurzzeitversuch Oedometer  $\phi$  250 mm G170 (2010) C = 20%

Abbildung 3-46: Oben: Verlauf des Steifemoduls  $E_{s1}$ ; Unten: Kornverteilungslinien nach definierten Beanspruchungen; Oedometerquerschnitt:  $\phi$ 250 mm; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 20%; Materialtyp: G170 (2010)

Tabelle 3-16: Grobfaktor je Sieblinie für Materialtyp G170 (2010)

| Sieblinie                         | vor Versuch (modifiziert) | C = 20%               | $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Grobfaktor                        | 275,2 cm <sup>2</sup>     | 256,9 cm <sup>2</sup> | 257,9 cm <sup>2</sup>        | 263,1 cm <sup>2</sup>         | 238,3 cm <sup>2</sup>         |
| $\Delta$ Grobfaktor <sup>1)</sup> | 0,0%                      | 6,6%                  | 6,3%                         | 4,4%                          | 13,4%                         |

<sup>1)</sup> Unterschied in % bezogen auf den Grobfaktor des Ausgangsmaterials



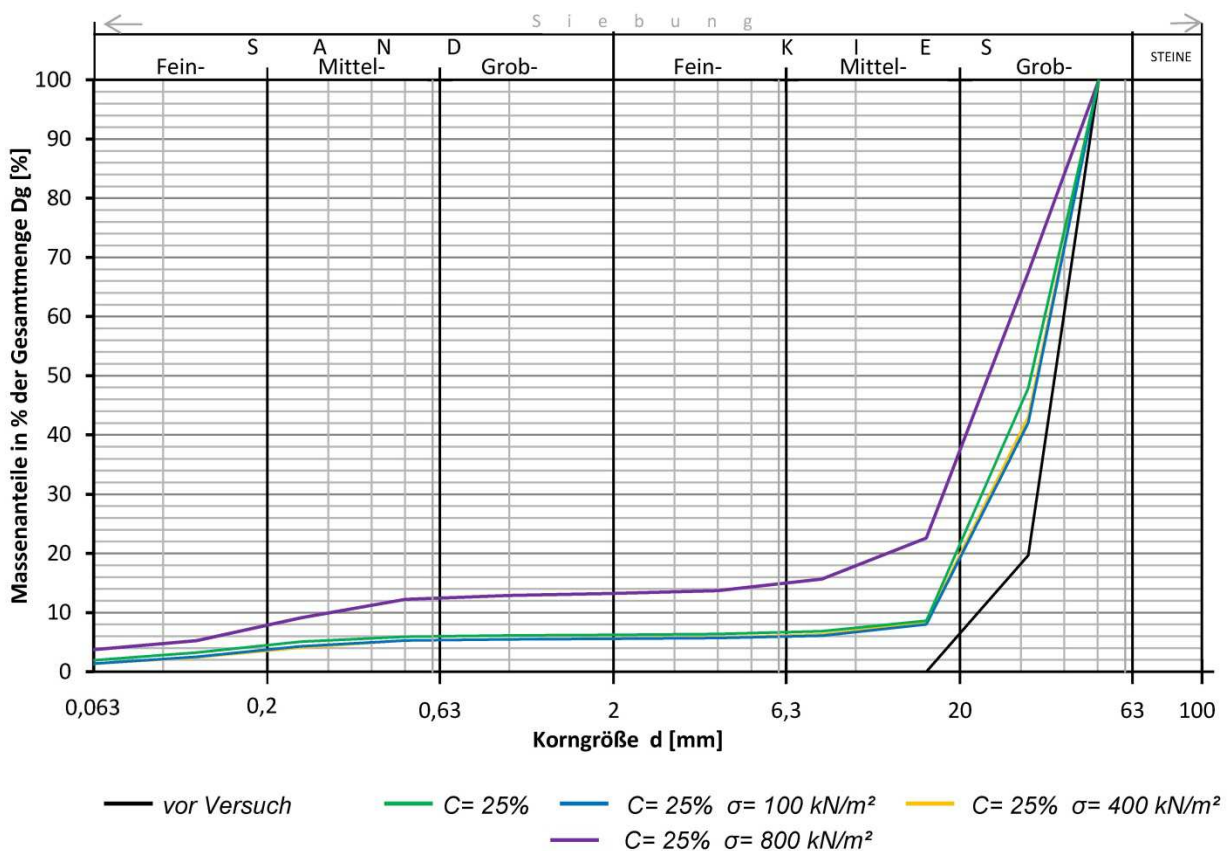
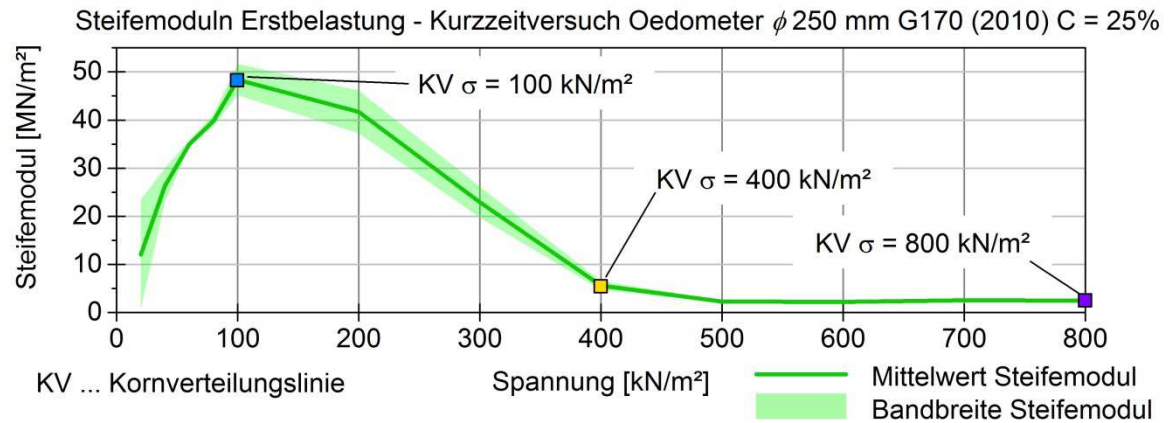


Abbildung 3-47: Oben: Verlauf des Steifemoduls  $E_{S1}$ ; Unten: Kornverteilungslinien nach definierten Beanspruchungen; Oedometerquerschnitt:  $\phi 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010)

Tabelle 3-17: Grobfaktor je Sieblinie für Materialtyp G170 (2010)

| Sieblinie                         | vor Versuch (modifiziert) | C = 25%             | $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Grobfaktor                        | 275,2 $\text{cm}^2$       | 253,3 $\text{cm}^2$ | 256,2 $\text{cm}^2$           | 259,0 $\text{cm}^2$           | 231,3 $\text{cm}^2$           |
| $\Delta$ Grobfaktor <sup>1)</sup> | 0,0%                      | 8,0%                | 6,9%                          | 5,9%                          | 16,0%                         |

<sup>1)</sup> Unterschied in % bezogen auf den Grobfaktor des Ausgangsmaterials

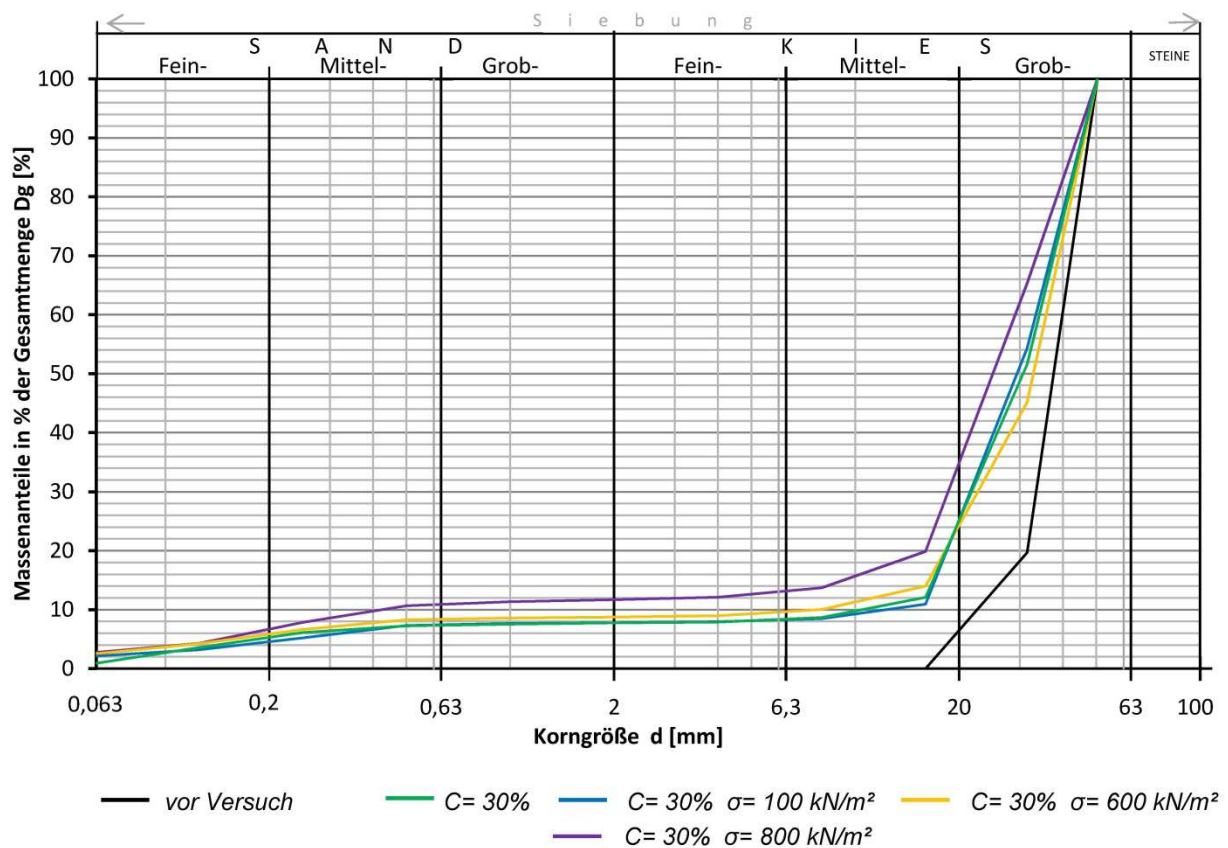
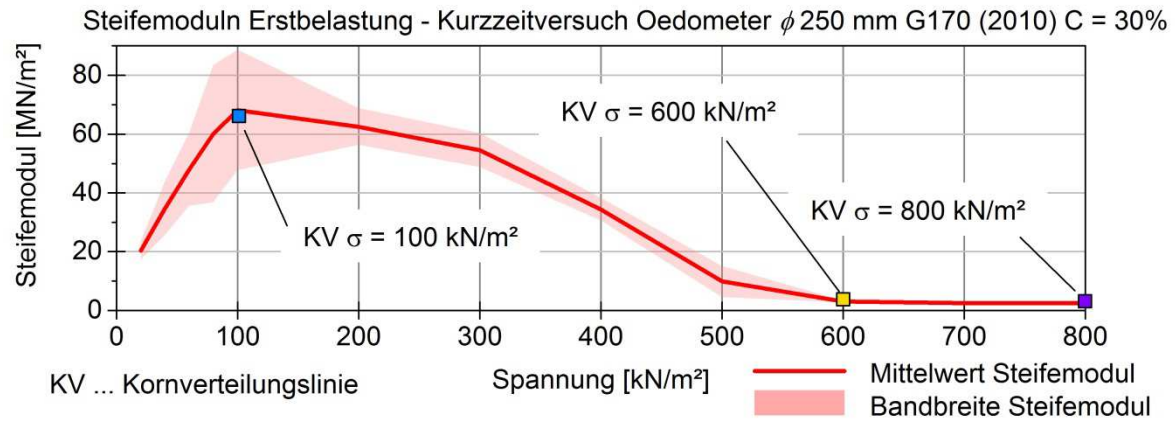


Abbildung 3-48: Oben: Verlauf des Steifemoduls  $E_{s1}$ ; Unten: Kornverteilungslinien nach definierten Beanspruchungen; Oedometerquerschnitt:  $\phi$ 250 mm; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 30%; Materialtyp: G170 (2010)

Tabelle 3-18: Grobfaktor je Sieblinie für Materialtyp G170 (2010)

| Sieblinie                         | vor Versuch (modifiziert) | C = 30%               | $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 600 \text{ kN/m}^2$ | $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Grobfaktor                        | 275,2 cm <sup>2</sup>     | 248,9 cm <sup>2</sup> | 248,7 cm <sup>2</sup>         | 248,5 cm <sup>2</sup>         | 236,0 cm <sup>2</sup>         |
| $\Delta$ Grobfaktor <sup>1)</sup> | 0,0%                      | 9,6%                  | 9,6%                          | 9,7%                          | 13,2%                         |

<sup>1)</sup> Unterschied in % bezogen auf den Grobfaktor des Ausgangsmaterials

Die oben angeführten Versuchsergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

- Eine nennenswerte Kornverfeinerung der verdichteten Proben tritt im Zuge des Kurzzeit-Kompressionsversuchs erst ab jener Spannung auf, bei welcher der Steifemodul  $E_{S1}$  sich nicht mehr signifikant ändert.
- Mit zunehmender Verdichtung  $C$  nimmt die Kornverfeinerung zu.

Abbildung 3-49 zeigt die Kornverteilungslinien von Proben ohne Verdichtung ( $C = 0\%$ ) nach Kurzzeit-Kompressionsversuchen, die mit Spannungen von  $\sigma = 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700$  und  $800 \text{ kN/m}^2$  beansprucht wurden. Es zeigt sich, dass die Kornverfeinerung mit steigender Spannung nahezu kontinuierlich zunimmt.

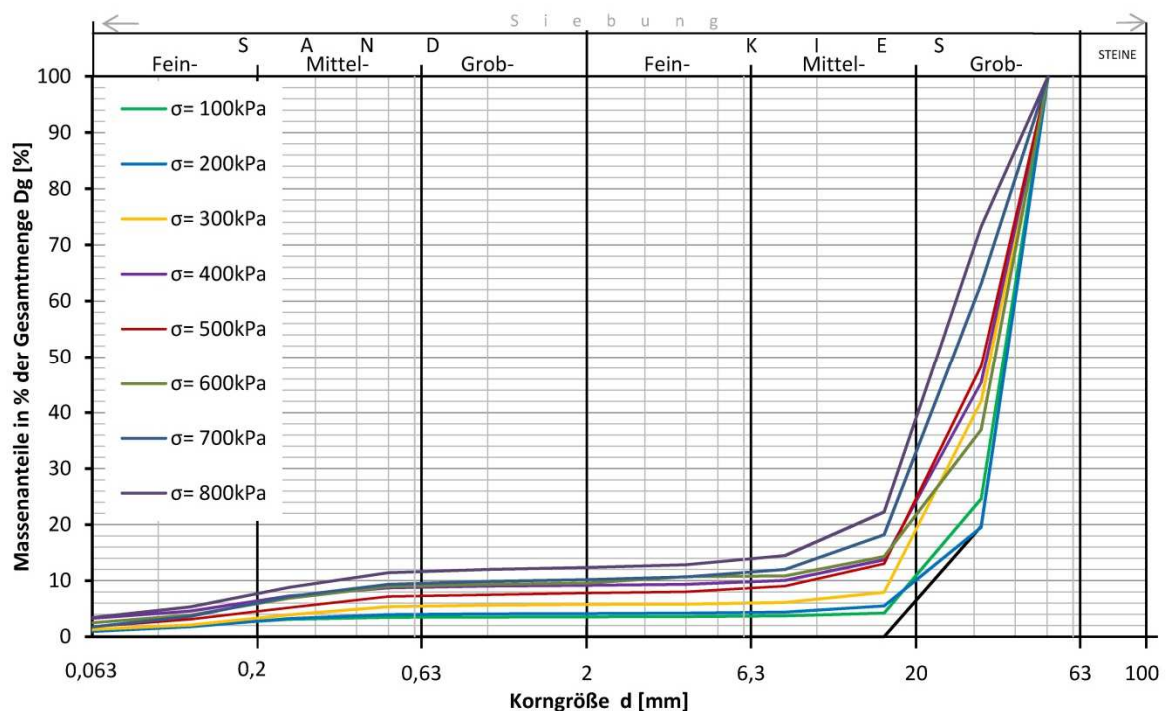


Abbildung 3-49: Oben: Verlauf des Steifemoduls  $E_{S1}$ ; Unten: Kornverteilungslinien nach definierten Beanspruchungen; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung:  $0\%$ ; Materialtyp: G170 (2010)

### 3.3.6 Kompressionsversuche - Oedometerquerschnitt $\varnothing 250 \text{ mm}$ – Langzeitversuch

Die durchgeführten Langzeit-Kompressionsversuche dienen zur Ermittlung der Steifemoduln für die Erstbelastung  $E_{S1}$  und die Wiederbelastung  $E_{S2}$  unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Materialverhaltens von GSG.

#### 3.3.6.1 Versuchsdurchführung

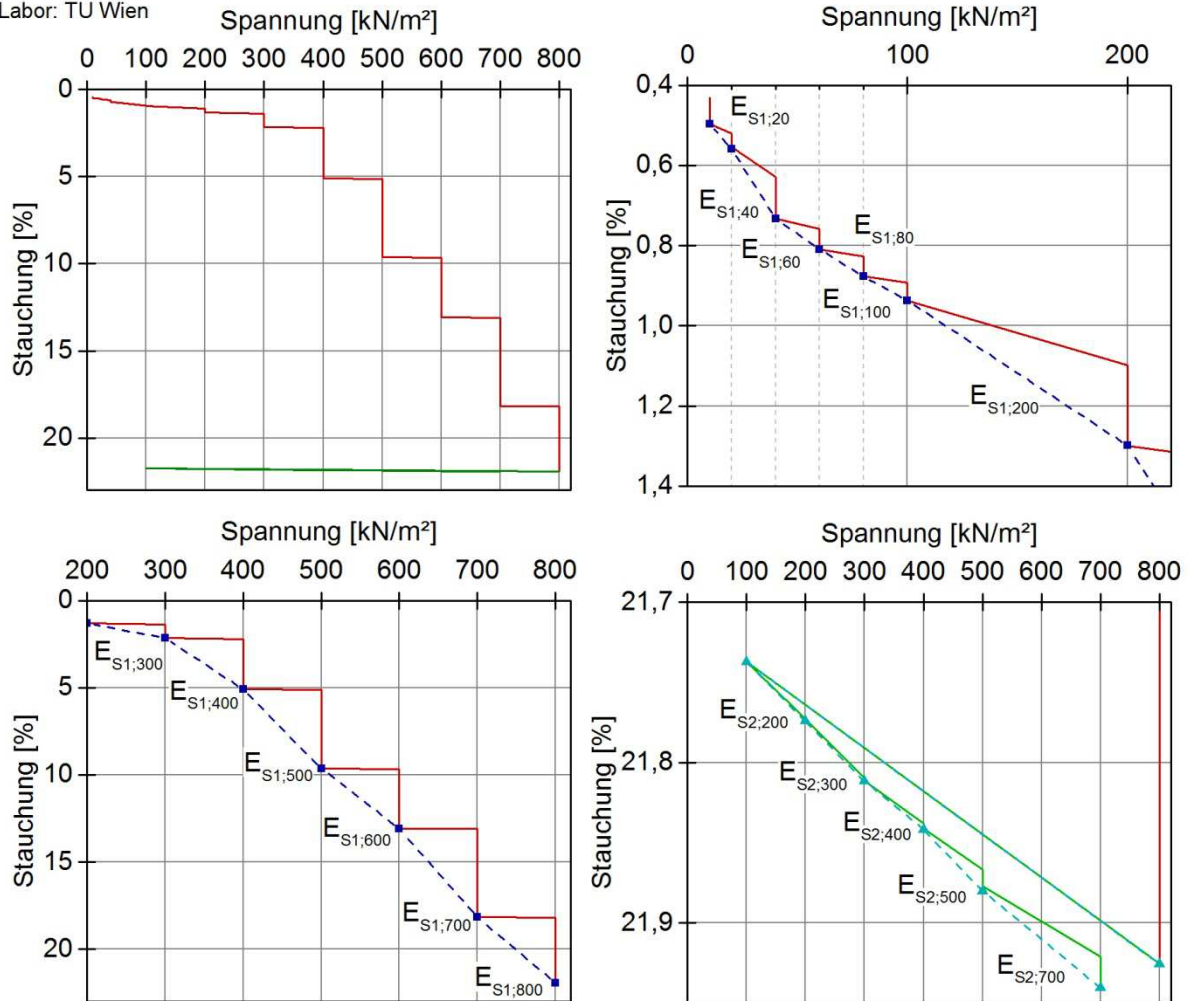
Die Verdichtung der Proben im Oedometer mit einem Durchmesser von  $250 \text{ mm}$  und einer Höhe von  $200 \text{ mm}$  erfolgte wie bereits in Abschnitt 3.3.4 beschrieben. Die Laststeigerung im Zuge der Erstbelastung erfolgte durch Laststufen mit Spannungen von  $\sigma = 2, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700$  und  $800 \text{ kN/m}^2$ . Nach Beendigung der letzten Laststufe der

Erstbelastung ( $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ ) wurden die Proben bis auf die Spannung von  $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$  entlastet. Danach erfolgte die Wiederbelastung durch Laststufen mit den jeweiligen Spannungen von  $\sigma = 100, 200, 300, 400, 500, 600$  und  $700 \text{ kN/m}^2$ . Bei Unterschreitung einer Stauchungsrate von 0,05% der Probenhöhe je Stunde wurde die Spannung auf das Niveau der nächsten Laststufe gesteigert. Je Materialtyp G150 (2011), G170 (2012), G170 (2010) und G210 (2011) wurde jeweils 1 Versuch mit den Verdichtungen von  $C = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%$  durchgeführt.

### **3.3.6.2 Auswertung und Ergebnisse**

Für die Auswertung der Langzeit-Kompressionsversuche wurden die Steifemoduln für die Erstbelastung  $E_{S1}$  und die Wiederbelastung  $E_{S2}$  herangezogen. Die Ermittlung der Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  resultiert aus den Differenzen der Stauchungen am Ende von zwei aufeinander folgenden Laststufen und aus den Differenzen der zugehörigen Spannungen (Sekantenmodul). Abbildung 3-50 zeigt exemplarisch die Ermittlung der Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$ .





|                 |                             |                      |                     |                     |                     |                     |                      |                      |                      |                     |                     |                     |                     |                     |       |
|-----------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|
| 1 <sup>1)</sup> | $\sigma$ <sup>3)</sup>      | [kN/m <sup>2</sup> ] | 10                  | 20                  | 40                  | 60                  | 80                   | 100                  | 200                  | 300                 | 400                 | 500                 | 600                 | 700                 | 800   |
|                 | $\varepsilon$ <sup>4)</sup> | [%]                  | 0,50                | 0,56                | 0,73                | 0,81                | 0,88                 | 0,94                 | 0,36                 | 2,15                | 5,08                | 9,63                | 13,08               | 18,16               | 21,93 |
|                 | $E_S$ <sup>5)</sup>         | [MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{S1;20}$<br>15,9 | $E_{S1;40}$<br>11,5 | $E_{S1;60}$<br>25,7 | $E_{S1;80}$<br>29,9 | $E_{S1;100}$<br>33,2 | $E_{S1;200}$<br>27,6 | $E_{S1;300}$<br>11,7 | $E_{S1;400}$<br>3,4 | $E_{S1;500}$<br>2,2 | $E_{S1;600}$<br>2,9 | $E_{S1;700}$<br>2,0 | $E_{S1;800}$<br>2,7 |       |

|                 |                             |                      |  |  |  |  |  |                       |                       |                       |                       |                       |       |  |
|-----------------|-----------------------------|----------------------|--|--|--|--|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|--|
| 2 <sup>2)</sup> | $\sigma$ <sup>3)</sup>      | [kN/m <sup>2</sup> ] |  |  |  |  |  | 100                   | 200                   | 300                   | 400                   | 500                   | 700   |  |
|                 | $\varepsilon$ <sup>4)</sup> | [%]                  |  |  |  |  |  | 21,74                 | 21,77                 | 21,81                 | 21,84                 | 21,88                 | 21,94 |  |
|                 | $E_S$ <sup>5)</sup>         | [MN/m <sup>2</sup> ] |  |  |  |  |  | $E_{S2;200}$<br>270,2 | $E_{S2;300}$<br>266,7 | $E_{S2;400}$<br>332,0 | $E_{S2;500}$<br>261,3 | $E_{S2;700}$<br>329,7 |       |  |

1) Erstbelastung

4) Stauchung

2) Wiederbelastung

5) Steifemodul als Sekante

3) Normalspannung der Laststufen

— Erstbelastung

— Wiederbelastung

Abbildung 3-50: Bestimmung der Steifemoduln; Oedometerquerschnitt:  $\varnothing 250$  mm; Belastung: Langzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp G170 (2010);

Abbildung 3-51 zeigt den Zusammenhang zwischen der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  und des Steifemoduls  $E_{S1,200}$  ( $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2 \div 200 \text{ kN/m}^2$ ). Ab einer Trockendichte von  $\rho_{d,G,C} = 0,19 \text{ g/cm}^3$  steigt der Steifemodul  $E_{S1,200}$ .

Labor: TU Wien

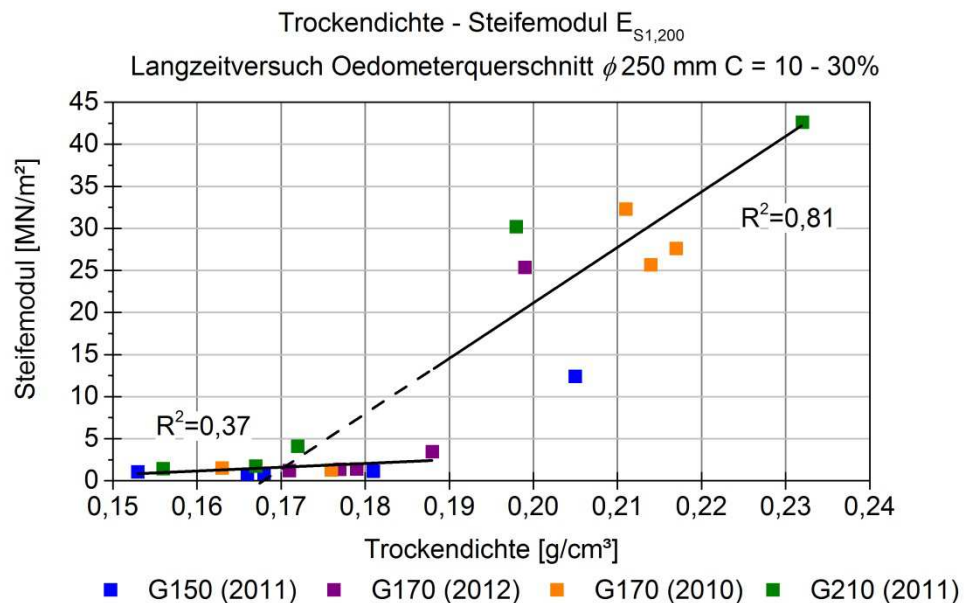


Abbildung 3-51: Steifemodul  $E_{S1,200}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$ ; Oedometerquerschnitt:  $\phi 250 \text{ mm}$ ; Belastung: Langzeitversuch

Die ermittelten Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  sind in Abhängigkeit von der Spannung in Abbildung 3-52 dargestellt. Aus den Verläufen der Steifemoduln  $E_{S1}$  können folgende Aussagen getroffen werden:

- Für den Steifemodul  $E_{S1}$  ist das Maß der Verdichtung  $C$  von maßgebender Bedeutung. Zufolge einer höheren Verdichtung  $C$  resultiert ein höherer Steifemodul  $E_{S1}$ .
- Der Steifemodul  $E_{S1}$  ist von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  abhängig. Dies zeigt sich durch die Zunahme der Stauchung über der Zeit. Materialtypen mit hohen einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  weisen eine geringere Zunahme der Stauchung mit der Zeit auf (s. Abbildung 3-54).

Die Verläufe der Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  sind in Abbildung 3-53 dargestellt. Die Steifemoduln  $E_{S2}$  sind um ein Vielfaches größer als jene der Erstbelastung.

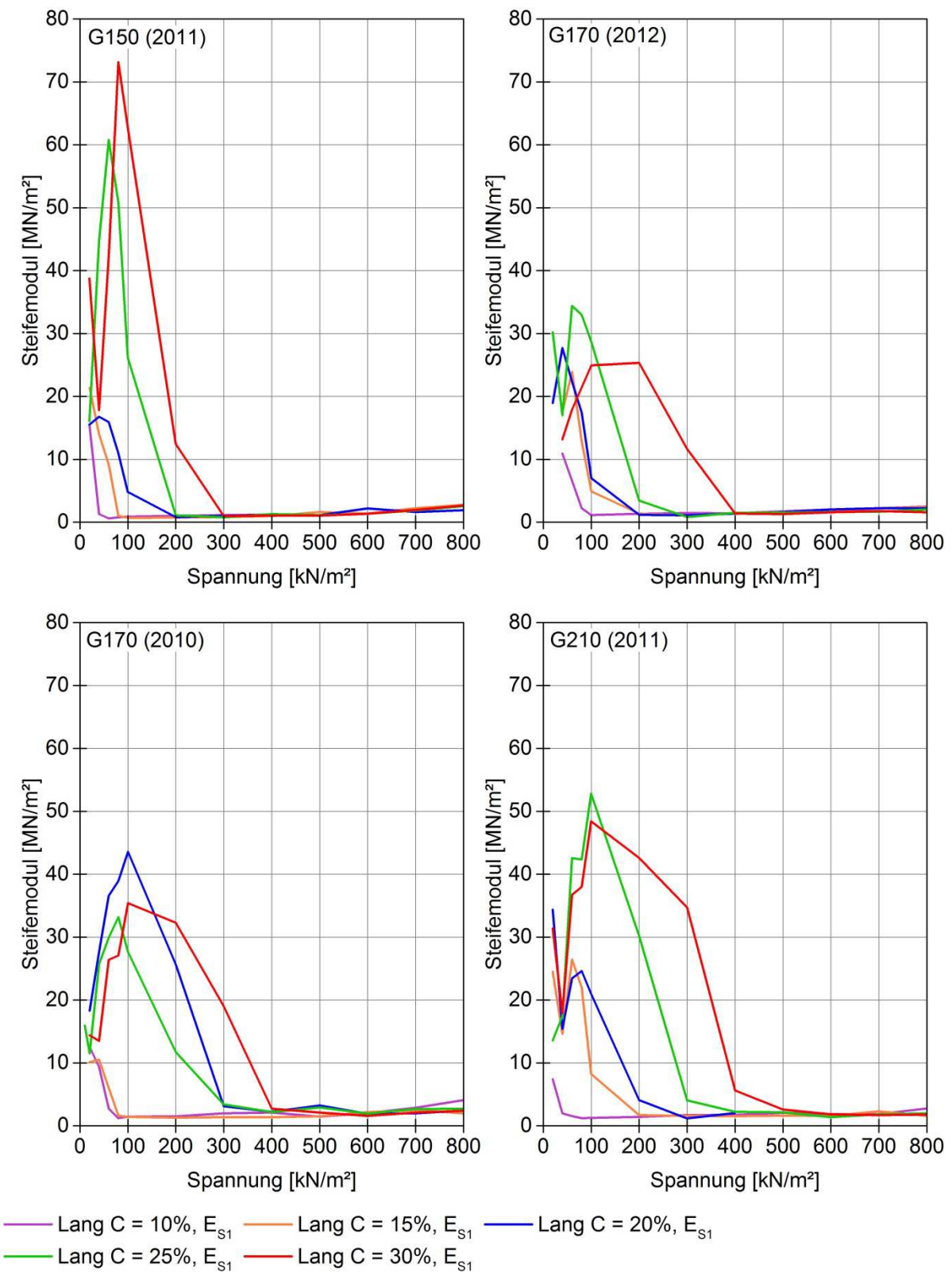


Abbildung 3-52: Steifemoduln der Erstbelastung je Materialtyp und Verdichtung;  
Oedometerquerschnitt:  $\phi$ 250 mm; Belastung: Langzeitversuch;

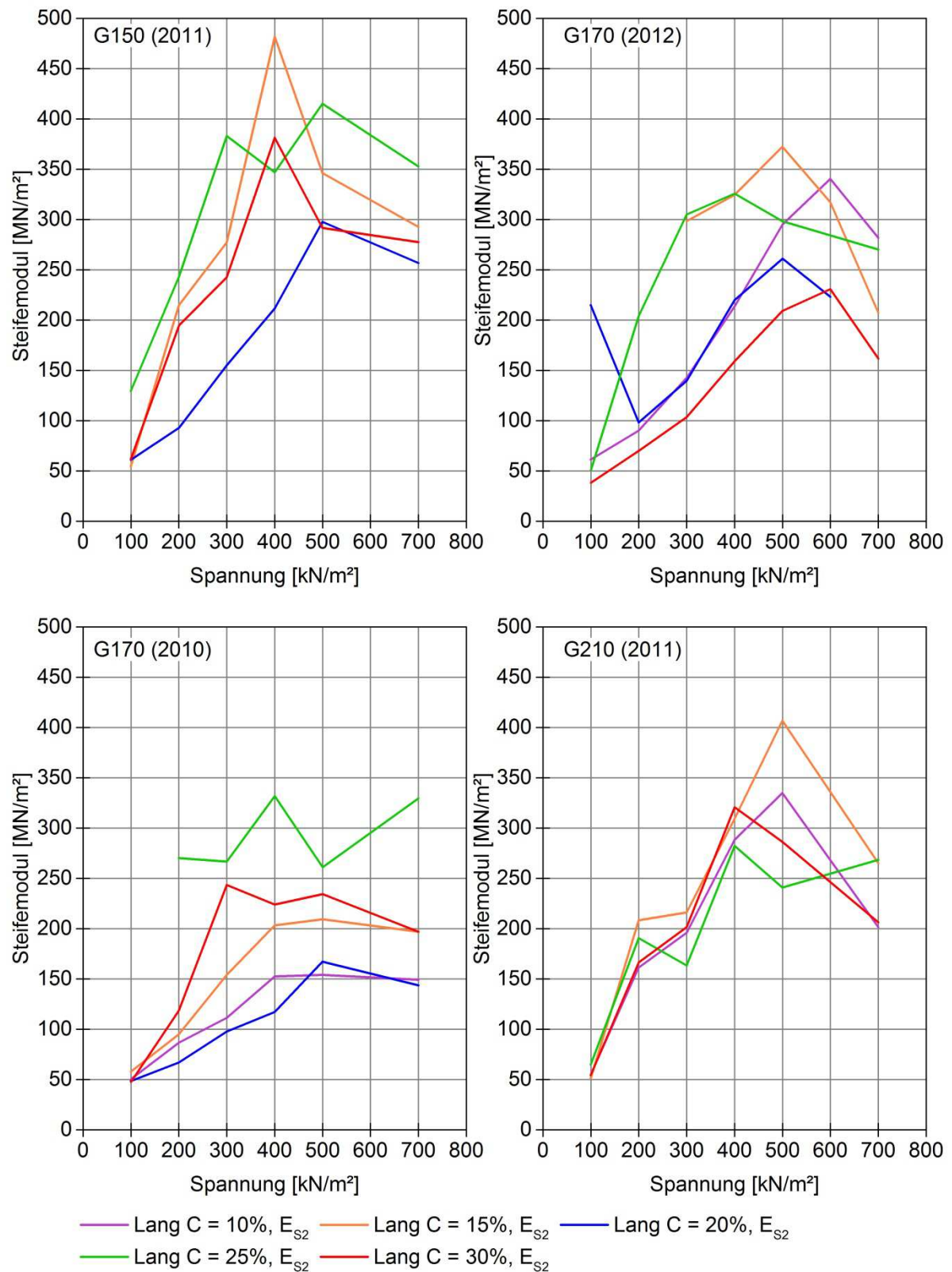
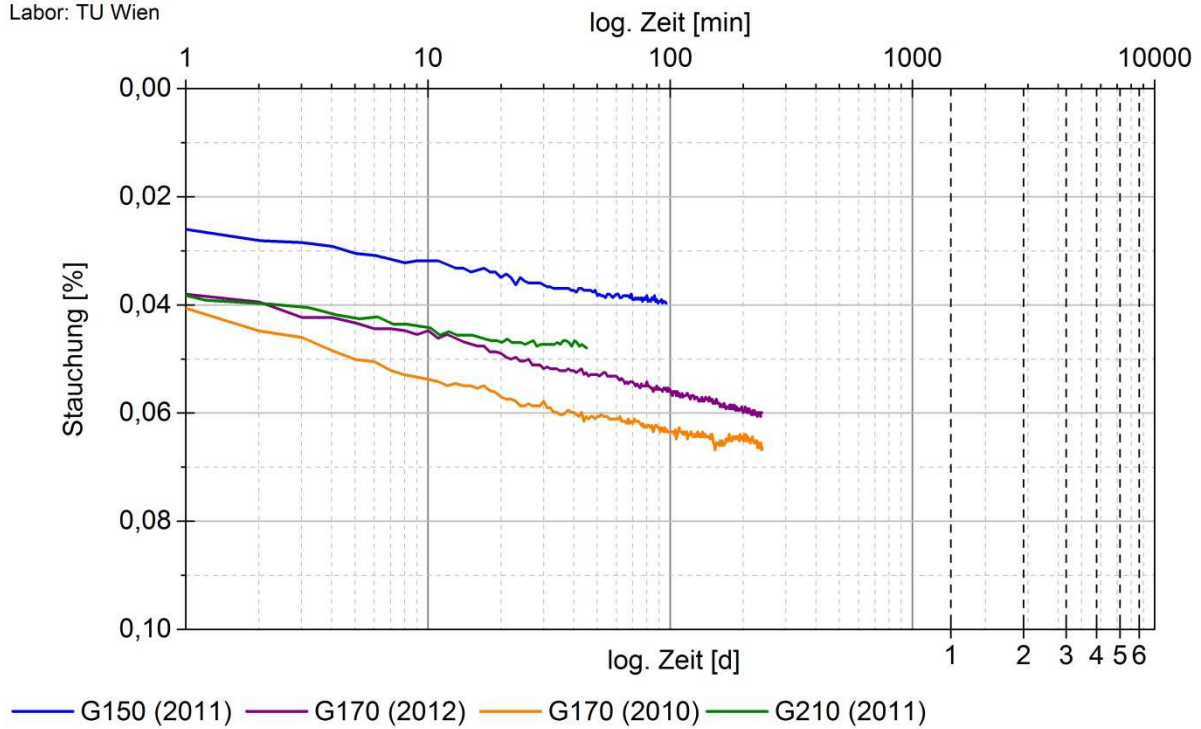


Abbildung 3-53: Steifemoduln der Wiederbelastung je Materialtyp und Verdichtung; Oedometerquerschnitt:  $\phi$ 250 mm; Belastung: Langzeitversuch;



Zeitabhängige Stauchungen - Erstbelastung  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$   $C = 25\%$  Oedometerquerschnitt  $\phi 250 \text{ mm}$

Labor: TU Wien



Labor: TU Wien

Zeitabhängige Stauchungen - Erstbelastung  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$   $C = 25\%$

Oedometerquerschnitt  $\phi 250 \text{ mm}$

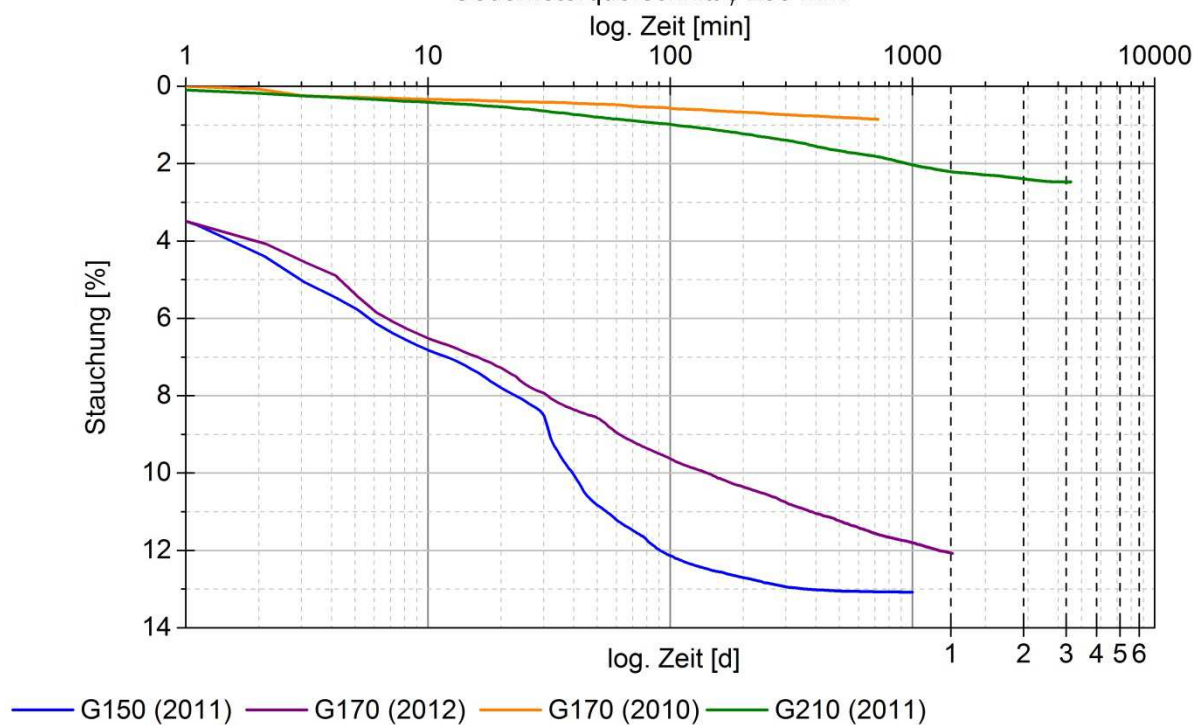


Abbildung 3-54: Zeitabhängige Stauchungen der Erstbelastung für die Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$ ; Oedometerquerschnitt:  $\phi 250 \text{ mm}$ ; Verdichtung:  $C = 25\%$

Abbildung 3-54 zeigt für die einzelnen Materialtypen die zeitabhängigen Stauchungen für Proben mit einer Verdichtung von  $C = 25\%$ . Bei der Laststufe mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  sind bereits nach 1 min ca. 60% ÷ 80% der gesamten Stauchungen eingetreten und es liegt daher nahezu kein zeitabhängiges Materialverhalten vor. Bei den Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$  beträgt der Anteil der Stauchungen nach 1 min ca. 0% ÷ 27% der gesamten Stauchungen der Laststufen und es liegt somit ein überwiegend zeitabhängiges Spannungs-Stauchungsverhalten vor. Die Zunahme der Stauchung über der Zeit ist von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  abhängig. Materialtypen mit hohen einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  weisen eine geringere Zunahme der Stauchung mit der Zeit auf.

### 3.3.7 Kompressionsversuche – Oedometerquerschnitt 500 mm x 500 mm – Kurzzeitversuch

Der Oedometer ist 200 mm hoch, mit einem quadratischen Querschnitt und einer Seitenlänge von 500 mm (= Oedometer 500 mm x 500 mm). Durch die im Vergleich zum Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm größere Querschnittsfläche soll der Einfluss der Größe des Oedometers auf die Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  aufgezeigt werden.

#### 3.3.7.1 Versuchsdurchführung

Die Proben wurden in den Oedometer geschüttet und mit einem Proctorhammer mit einer Fallmasse von 4,5 kg verdichtet. Zwischen Proctorhammer und der Oberfläche der Proben wurde eine lastverteilende Platte mit einer Größe von 15 cm x 20 cm eingelegt.

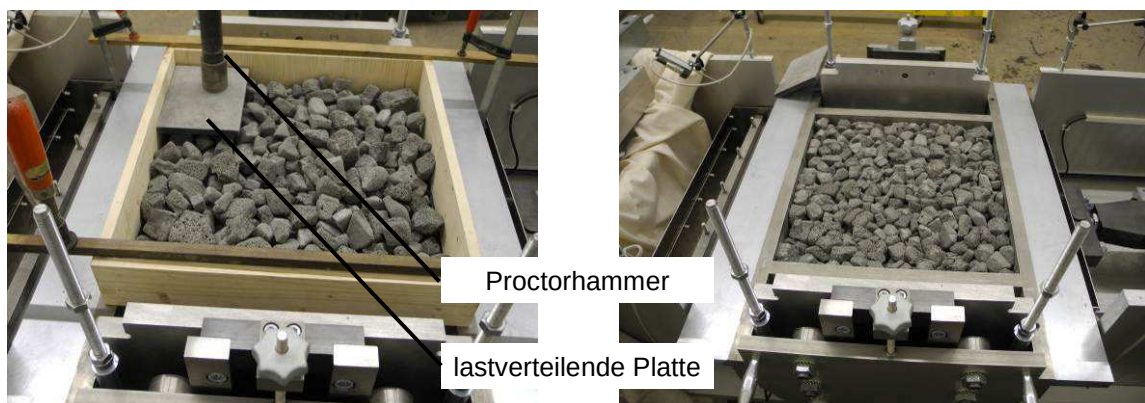


Abbildung 3-55: Probe vor (links) und nach dem Verdichten (rechts); Oedometerquerschnitt: 500 x 500 mm; Verdichtung: 25%; Materialtyp G150 (2011);

Zufolge der Stöße des Proctorhammers wurde das Korngemisch unterhalb der lastverteilenden Platte verdichtet, wobei seitlich der lastverteilenden Platte Körner nach oben verdrängt wurden und das Korngemisch seitlich der lastverteilenden Platte aufgelockert wurde. Im Vergleich dazu ist bei der Verdichtung der Proben im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm eine Auflockerung durch die vollflächig aufliegende Stahlplatte ausgeschlossen.

Die Belastung der Proben bestand aus 5 Lastzyklen. Die Steigerung der Spannung innerhalb der Lastzyklen erfolgte mit einer konstanten Rate von  $100 \text{ kN/m}^2$  je Minute. Die jeweiligen

Spannungsmaxima der Lastzyklen betrugen 100 kN/m<sup>2</sup>, 200 kN/m<sup>2</sup>, 300 kN/m<sup>2</sup>, 400 kN/m<sup>2</sup> und 500 kN/m<sup>2</sup>. Nach Erreichen des Spannungsmaximums im jeweiligen Lastzyklus wurde die Spannung mit einer Rate von 100 kN/m<sup>2</sup> je Minute auf ein Minimum von 10 kN/m<sup>2</sup> reduziert.

Die Verdichtung der Proben wurde im Bereich von  $C = 10$  und 25% variiert. Je Materialtypen G150 (2011), G170 (2012) und G210 (2011) und Verdichtung  $C$  wurde ein Kurzzeit-Kompressionsversuch durchgeführt.

### 3.3.7.2 Auswertung und Ergebnisse

Für die Auswertung der Versuche wurden die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  und der Wiederbelastung  $E_{S2}$  herangezogen.

Labor: TU Wien

Steifemoduln - Langzeitversuch, Oedometerquerschnitt 500 x 500 mm,  $C = 25\%$

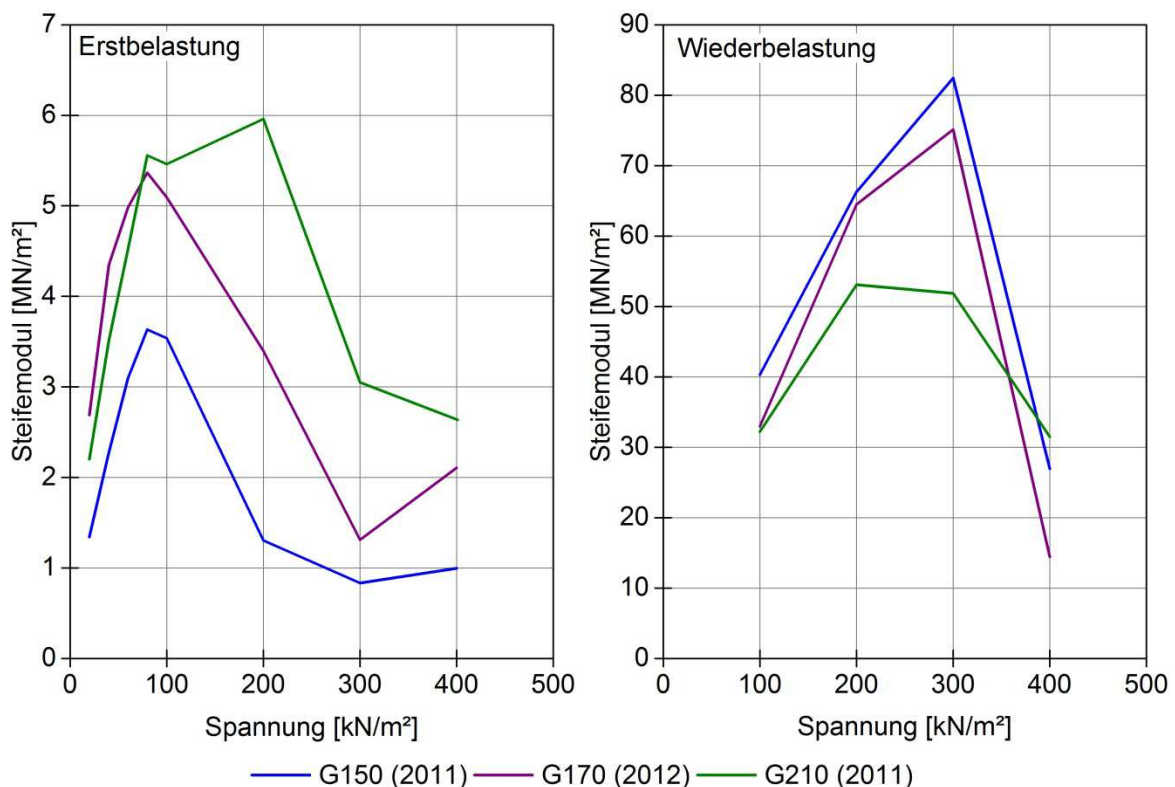


Abbildung 3-56: Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  je Verdichtung und Materialtyp; Oedometerquerschnitt: 500 mm x 500 mm; Belastung: Kurzzeitversuch;

Abbildung 3-56 zeigt die Verläufe der Steifemoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  in Abhängigkeit von der Spannung. Vergleicht man die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  der einzelnen Versuche, so ergibt eine höhere Verdichtung  $C$  höhere Steifemoduln  $E_{S1}$ .

Der Einfluss der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  auf den Steifemodul  $E_{S1}$  liegt innerhalb des Streubereiches der durchgeführten Kurzzeit-Kompressionsversuche.

Abbildung 3-57 zeigt den Zusammenhang zwischen der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  und dem Steifemodul  $E_{S1,200}$ . Der Steifemodul  $E_{S1,200}$  steigt mit zunehmender Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  an.

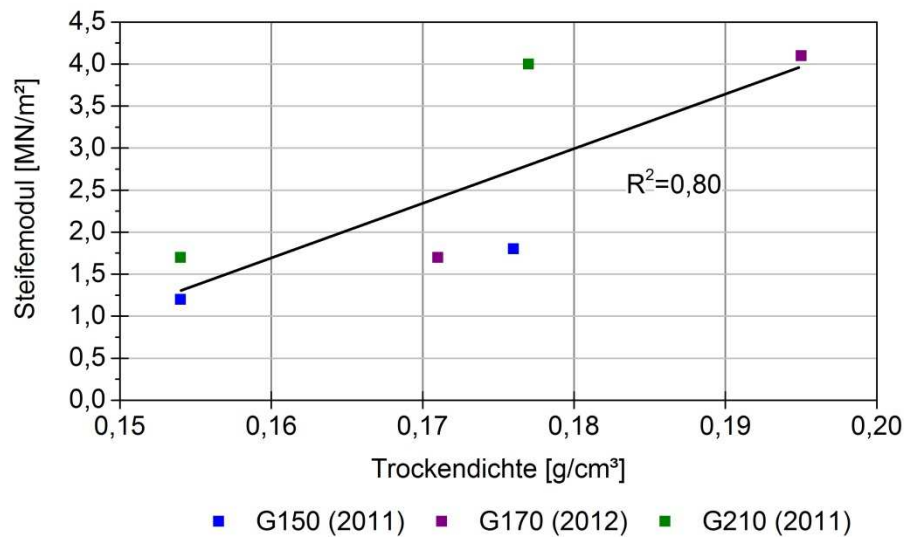


Abbildung 3-57: Steifemodul  $E_{S1,200}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_{d,G,C,i}$ ; Oedometerquerschnitt: 500 mm x 500 mm; Belastung: Kurzzeitversuch

### 3.3.8 Kompressionsversuche – Oedometerquerschnitt 500 mm x 500 mm – Langzeitversuch

Diese Versuche dienten zur Ermittlung der Steifemoduln der verschiedenen Materialtypen unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Last-Verformungsverhalten von GSG im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm und einer Höhe von 200 mm.

#### 3.3.8.1 Versuchsdurchführung

Der Einbau und die Verdichtung der Proben erfolgte wie bereits in Kapitel 3.3.7 beschrieben. Die Laststeigerung im Zuge der Erstbelastung erfolgte durch Laststufen mit den jeweiligen Spannungen von  $\sigma = 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300$  und  $400 \text{ kN/m}^2$ . Nach Beendigung der letzten Laststufe der Erstbelastung ( $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ ) wurden die Proben bis auf eine Spannung von  $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$  entlastet. Danach erfolgte die Wiederbelastung durch Laststufen mit den jeweiligen Spannungen von  $\sigma = 10, 100, 200, 300$  und  $400 \text{ kN/m}^2$ . Bei Unterschreitung einer Stauchungsrate von 0,05% der Probenhöhe je Stunde wurde die Spannung auf das Niveau der nächsten Laststufe gesteigert. Die Dauer der Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$  und  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$  wurden erst nach dem vollständigen Abklingen der Stauchungen der Proben beendet. Je Materialtyp G150 (2011), G170 (2012) und G210 (2011) wurde 1 Langzeit-Kompressionsversuch durchgeführt. Die Verdichtung C betrug bei allen 3 Versuchen 25%.

#### 3.3.8.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Ermittlung der Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  und der Wiederbelastung  $E_{S2}$  erfolgte wie im Kapitel 3.3.6 dargelegt.



Abbildung 3-58 zeigt die Verläufe der Steifemoduln für die Erstbelastung  $E_{S1}$  und die Wiederbelastung  $E_{S2}$  in Abhängigkeit von der Spannung je Materialtyp.

Labor: TU Wien

Steifemoduln - Langzeitversuch, Oedometerquerschnitt 500 x 500 mm, C = 25%

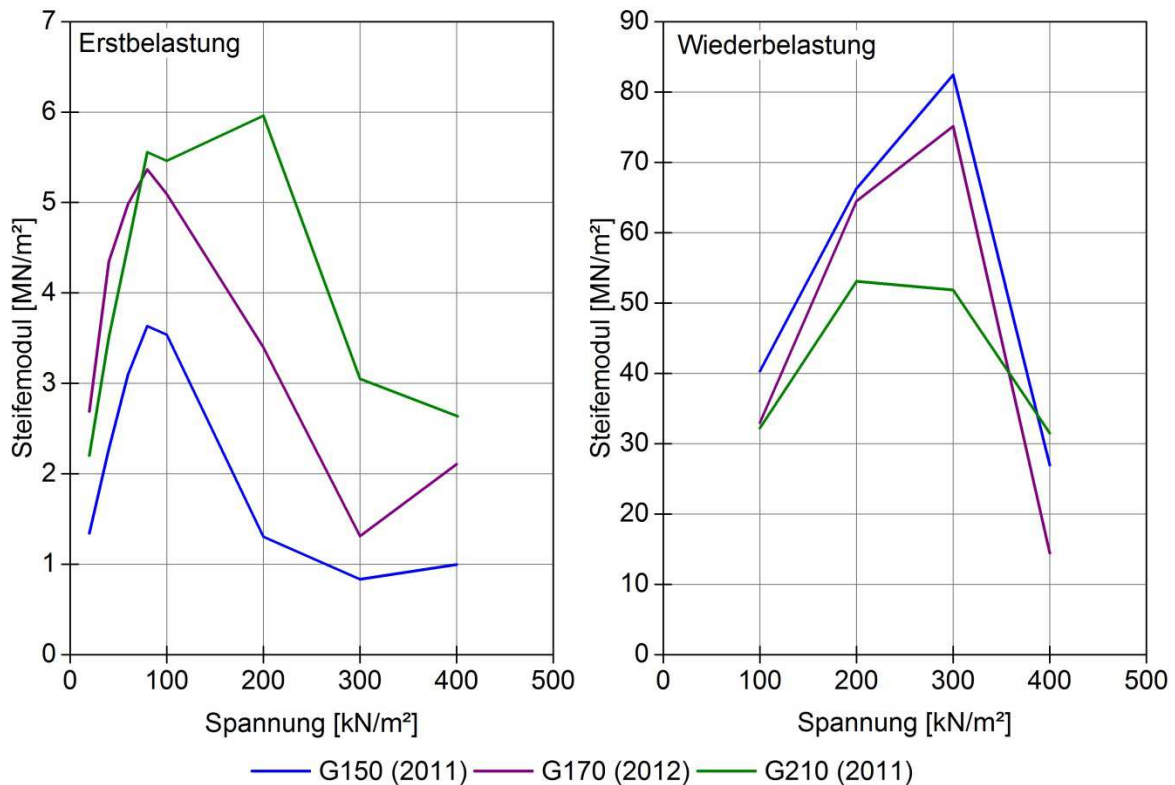


Abbildung 3-58: Steifemoduln der Erst- und Wiederbelastung je Materialtyp;  
Oedometerquerschnitt: 500 mm x 500 mm; Belastung: Langzeitversuch; Verdichtung: 25%

Die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  der untersuchten Materialtypen zeigen, dass der Materialtyp G210 (2011) mit der höchsten einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  die größten Steifemoduln  $E_{S1}$  und der Materialtyp G150 (2011) mit der niedrigsten einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  die niedrigsten Steifemoduln  $E_{S1}$  aufweisen. Der Einfluss der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  ist im Vergleich zu den Kurzzeitversuchen stärker ausgeprägt.

Die Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  sind um ein Vielfaches größer als jene der Erstbelastung  $E_{S1}$ .

Abbildung 3-59 zeigt den Zusammenhang zwischen der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  und dem Steifemodul  $E_{S1,200}$ .

Erstbelastung, Langzeitversuch, Oedometerquerschnitt 500 x 500 mm, C = 25%

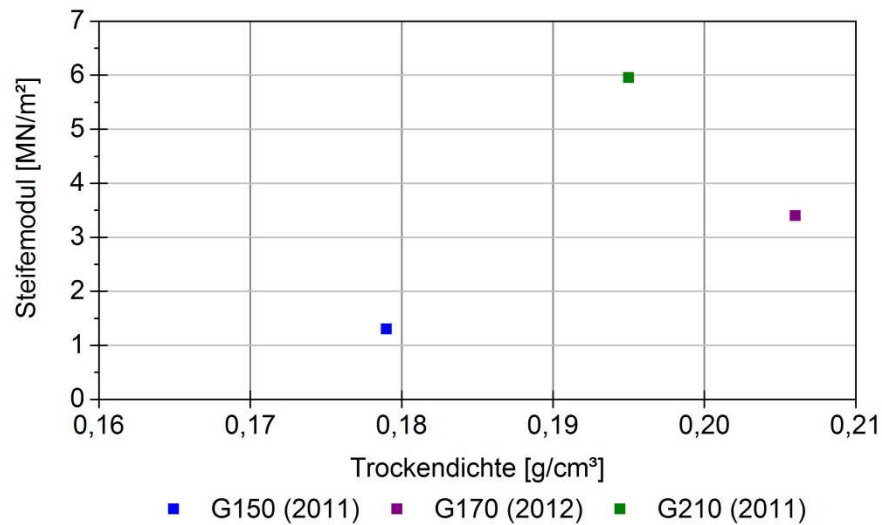


Abbildung 3-59: Steifemoduln  $E_{S1,200}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$ ;  
Oedometerquerschnitt: 500 mm x 500 mm; Belastung: Langzeitversuch

Abbildung 3-60 zeigt die zeitlichen Verläufe der Stauchungen und der Stauchungsraten der Proben im Zuge der Erstbelastung bei den Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN}/\text{m}^2$ . Die Stauchungen sind zur Gänze zeitabhängig. Weiters wurde die Spannung von  $\sigma = 80 \text{ kN}/\text{m}^2$  bis zum vollständigen Abklingen der Stauchungen aufrecht gehalten. Die grünen Punkte in Abbildung 3-60 symbolisieren jene Zeitpunkte, bei welchen die Dauer der Laststufen bei Anwendung der ÖNORM B 4420 (Stauchungsrate  $< 0,05\%/\text{Std.}$ ) beendet werden kann.

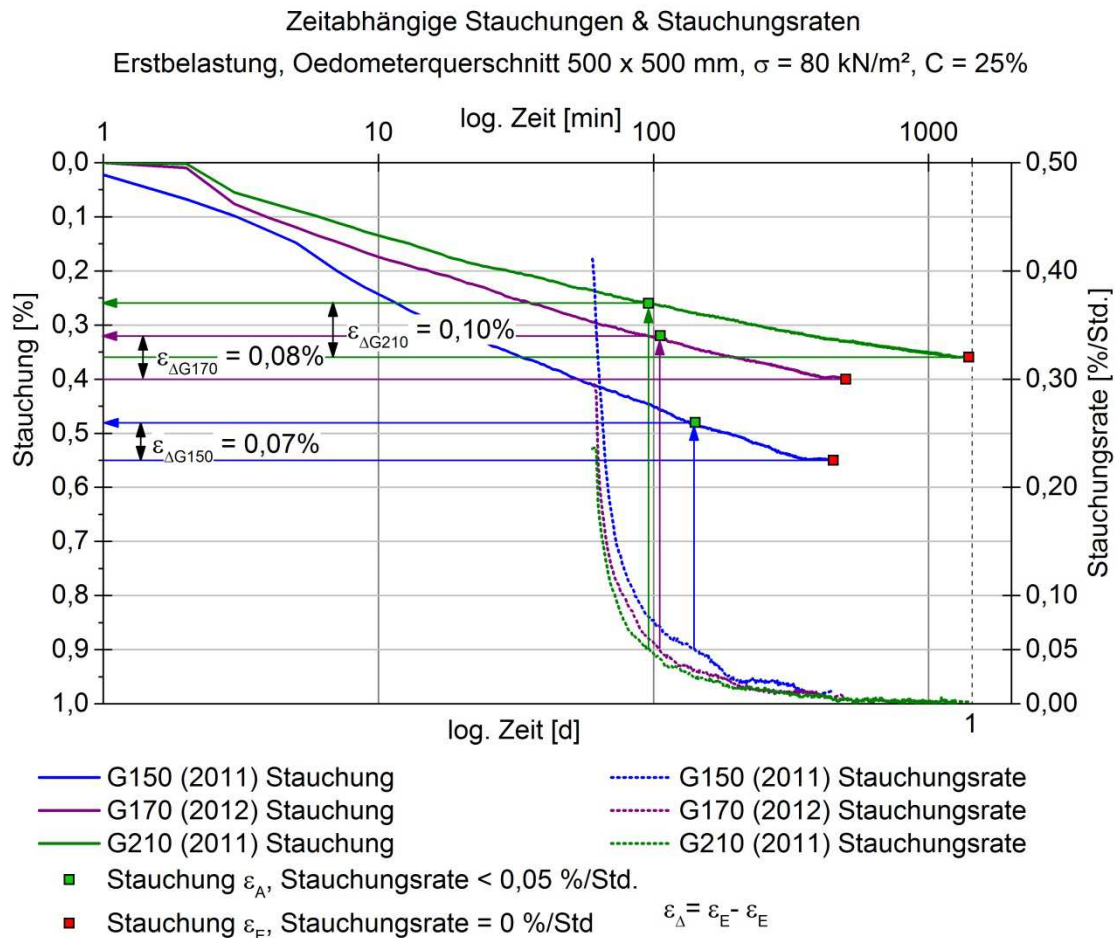


Abbildung 3-60: Zeitabhängige Stauchungen und Stauchungsrate der Erstbelastung  
 $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$ ; Oedometerquerschnitt: 500 mm x 500 mm; Verdichtung:  $C = 25\%$

Tabelle 3-19: Unterschiede der Steifemoduln bei Anwendung der ÖNORM B 4420 in Hinblick auf die Beendigung der Dauer der Laststufe (Stauchungsrate  $< 0,05\text{\%/Std.}$ ) für  $\sigma = 80 \text{ kN/m}^2$

| Probe       | 1<br>Steifemodul zufolge $\epsilon_A$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | 2<br>Steifemodul zufolge $\epsilon_E$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | 3<br>Differenz <sup>1)</sup><br>[MN/m <sup>2</sup> ] | 4)<br>Abweichung des Steifemoduls <sup>2)</sup><br>[%] |
|-------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| G150 (2011) | 4,17                                                          | 3,64                                                          | 0,53                                                 | 15                                                     |
| G170 (2012) | 5,00                                                          | 4,17                                                          | 0,83                                                 | 20                                                     |
| G210 (2011) | 7,69                                                          | 5,56                                                          | 2,13                                                 | 38                                                     |

1) Differenz aus Spalte 1 und Spalte 2

2) Quotient aus Spalte 3 und Spalte 2

$\epsilon_A$  Stauchung bei Unterschreitung der Stauchungsrate von  $0,05\text{\%/Std.}$

$\epsilon_E$  Stauchung am Ende der Laststufe

Die Anwendung des Abbruchkriteriums gemäß ÖNORM B 4420 (Stauchungsrate  $< 0,05\%/Std$ ) für die Dauer der Laststufen führt zur einer Erhöhung der Steifemoduln um  $15\% \div 38\%$  (s. Tabelle 3-19).

Abbildung 3-61 zeigt die zeitlichen Verläufe der Stauchungen und der Stauchungsraten der Proben im Zuge der Erstbelastung bei den Laststufen mit einer Spannung von  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$ . In Abhängigkeit vom Materialtyp kommt es nach spätestens 10 Tagen zu keinem Zuwachs der Stauchungen. Weiters sind die Stauchungen zur Gänze zeitabhängig. Die grünen Punkte in Abbildung 3-61 symbolisieren jene Zeitpunkte, bei welcher die Dauer der Laststufen bei Anwendung der ÖNORM B 4420 (Stauchungsrate  $< 0,05\%/Std$ .) beendet werden kann.

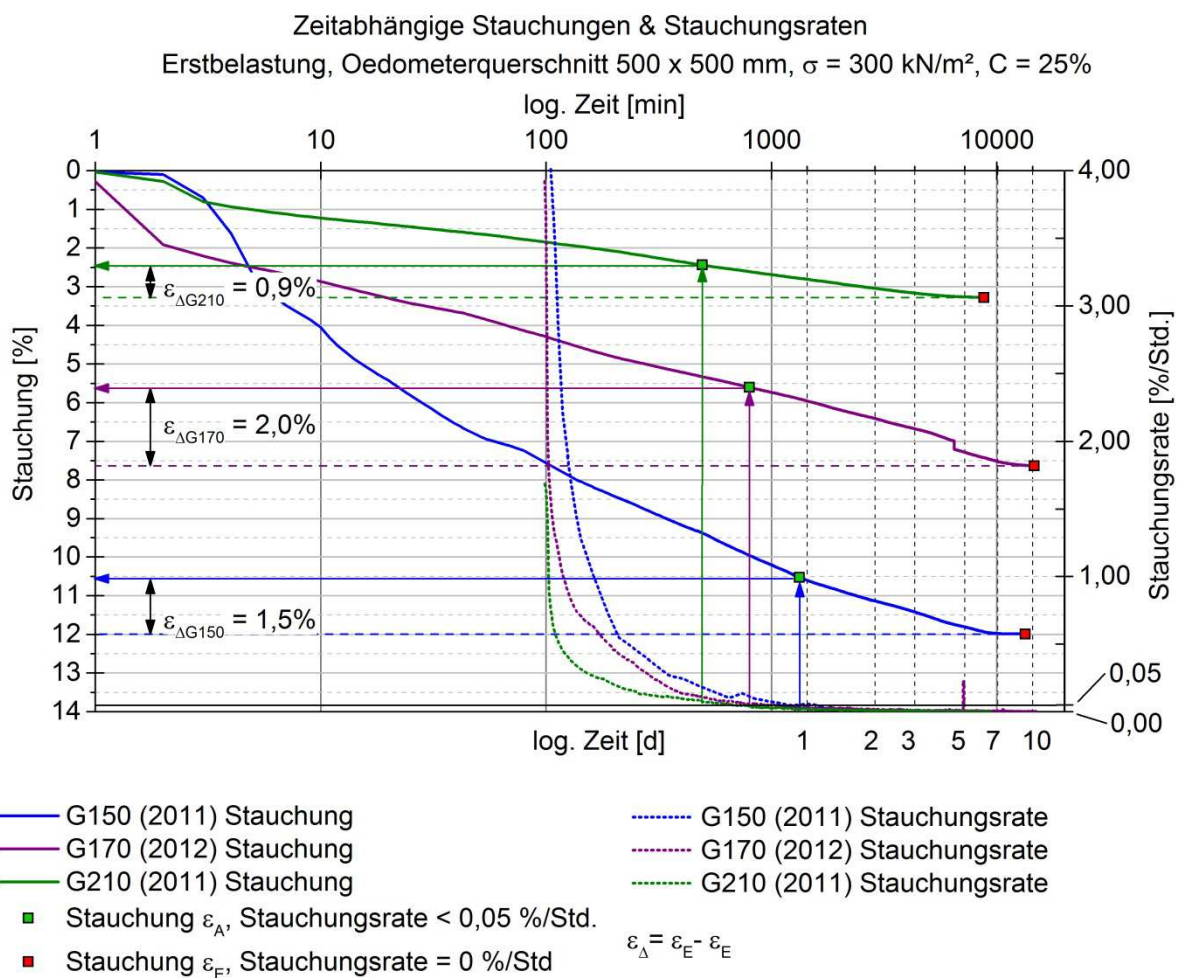


Abbildung 3-61: Zeitabhängige Stauchungen und Stauchungsrate der Erstbelastung  
 $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$ ; Oedometerquerschnitt: 500 mm x 500 mm; Verdichtung:  $C = 25\%$ ;

Die Anwendung der des Abbruchkriteriums der Dauer der Laststufe gemäß ÖNORM B 4420 (Stauchungsrate  $< 0,05\%/Std$ ) führt zur einer Erhöhung der Steifemoduln um  $14\% \div 38\%$  (s. Tabelle 3-20).

*Tabelle 3-20: Unterschiede der Steifemoduln bei Anwendung der ÖNORM B 4420 in Hinblick auf die Beendigung der Dauer der Laststufe (Stauchungsrate < 0,05%/Std.) für  $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$*

| Probe       | 1                                | 2                                | 3                       | 4 <sup>1)</sup>                           |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
|             | Steifemodul zufolge $\epsilon_A$ | Steifemodul zufolge $\epsilon_E$ | Differenz <sup>1)</sup> | Abweichung des Steifemoduls <sup>2)</sup> |
|             | [MN/m <sup>2</sup> ]             | [MN/m <sup>2</sup> ]             | [MN/m <sup>2</sup> ]    | [%]                                       |
| G150 (2011) | 0,95                             | 0,83                             | 0,12                    | 14                                        |
| G170 (2012) | 1,79                             | 1,32                             | 0,47                    | 36                                        |
| G210 (2011) | 4,17                             | 3,03                             | 1,14                    | 38                                        |

1) Differenz aus Spalte 1 und Spalte 2

2) Quotient aus Spalte 3 und Spalte 1

$\epsilon_A$  Stauchung bei Unterschreitung der Stauchungsrate von 0,05%/Std.

$\epsilon_E$  Stauchung am Ende der Laststufe

Die Zunahme der Stauchung über die Zeit ist von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  abhängig. Materialtypen mit hohen einaxialen Druckfestigkeiten  $\sigma_{c,k}$  weisen eine geringere Zunahme der Stauchung auf. (s. Abbildung 3-61). Dies kann wie folgt erklärt werden:

Das Langzeitverhalten von Glasschaumprismen im einaxialen Spannungszustand zeigt, dass die größten zeitabhängigen Stauchungen für Spannungen im Bereich der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  auftreten. Für Spannungen, welche kleiner sind als die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$ , traten nahezu keine zeitabhängigen Stauchungen auf.

Die Stauchungen der Proben im Zuge der Kompressionsversuche führen zu einem Anstieg der Korn-zu-Kornflächen innerhalb des Korngemisches (= Kontaktflächen). Bleibt die Spannung auf die Proben konstant, so führen die zeitabhängigen Stauchungen zu einem Anstieg der Kontaktflächen bzw. zu einer Reduzierung der Spannungen in den Kontaktflächen innerhalb der Proben. Sind nun die Spannungen in den Kontaktflächen kleiner als die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$ , so enden die zeitabhängigen Stauchungen der Proben. Bei Materialtypen mit einer höheren einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  enden die zeitabhängigen Stauchungen bei einem höheren Spannungsniveau in den Kontaktflächen und es sind somit kleinere Stauchungen für das Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit in den Kontaktflächen nötig, als bei Materialtypen mit einer geringeren einaxialen Druckfestigkeit.

### 3.3.9 Kompressionsversuche im Vergleich

Die folgenden Abbildungen dienen zur Veranschaulichung der Einflüsse der verschiedenen Versuchsdurchführungen bzw. Versuchsrandbedingungen auf die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$ .

Abbildung 3-62 zeigt einen Vergleich der Verläufe der Steifemoduln  $E_{S1}$  der Kurzzeit-Kompressionsversuche zwischen den Proben im Oedometer  $\varnothing 250 \text{ mm}$  und den Proben im Oedometer  $500 \times 500 \text{ mm}$ . Die Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  besitzen wesentlich höhere

Steifemoduln  $E_{S1}$  als die Proben im Oedometer 500 x 500 mm. Dies wird auf die unterschiedlichen Randbedingungen bei der Verdichtung der Proben zurückgeführt. So kommt es bei der Verdichtung der Proben im Oedometer 500 x 500 mm seitlich der lastverteilenden Platte zu Auflockerungen im Korngemisch (s. Abschnitt 3.3.7). Diese Auflockerungen sind bei der Verdichtung der Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm durch die vollflächig aufliegende Platte auf der Probenoberseite nicht möglich. Dadurch liegt nach der Verdichtung der Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm ein besserer Formschluss zwischen den Körnern (= Kornverspannung) vor, was zu höheren Steifemoduln  $E_{S1}$  der Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm führt.

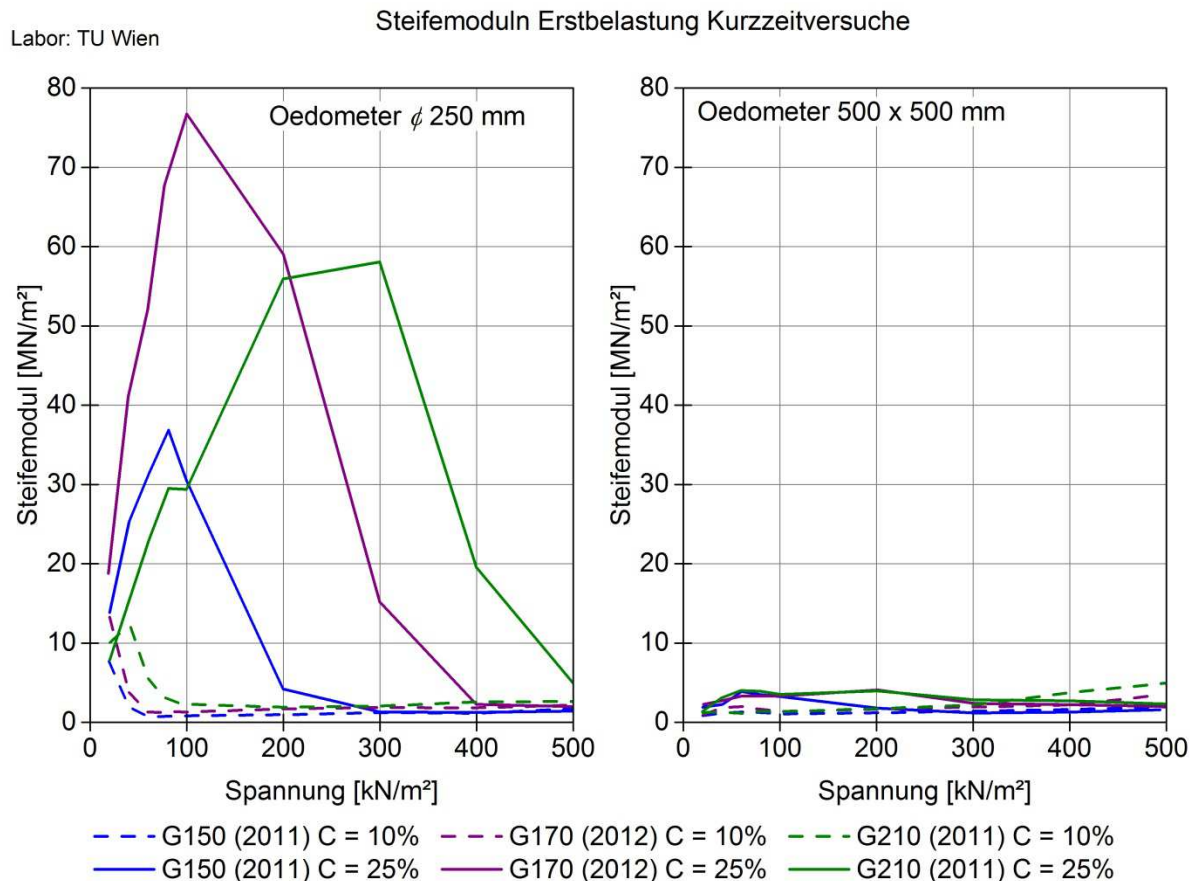


Abbildung 3-62: Vergleich der Steifemoduln  $E_{S1}$  zwischen den Kompressionsversuchen im Oedometer  $\varnothing 250$  mm und im Oedometer 500 mm x 500 mm

In Abbildung 3-63 sind links die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  von Kurzzeit-Kompressionsversuchen und rechts die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  von Langzeit-Kompressionsversuchen dargestellt. Beide Kompressionsversuche wurden im Oedometer mit einem Querschnitt 500 x 500 mm durchgeführt. Die Proben der Materialtypen G170 (2012) und G210 (2011) besitzen zufolge der Langzeit-Kompressionsversuche höhere Steifemoduln  $E_{S1}$  als zufolge der Kurzzeit-Kompressionsversuche. Beim Materialtyp G150 (2011) sind die Steifemoduln der Langzeit- und Kurzzeit-Kompressionsversuche nahezu identisch. Auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist somit keine eindeutige Aussage zum Unterschied der Steifemoduln  $E_{S1}$  zwischen den Kurzzeit- und den Langzeit-Kompressionsversuchen möglich.



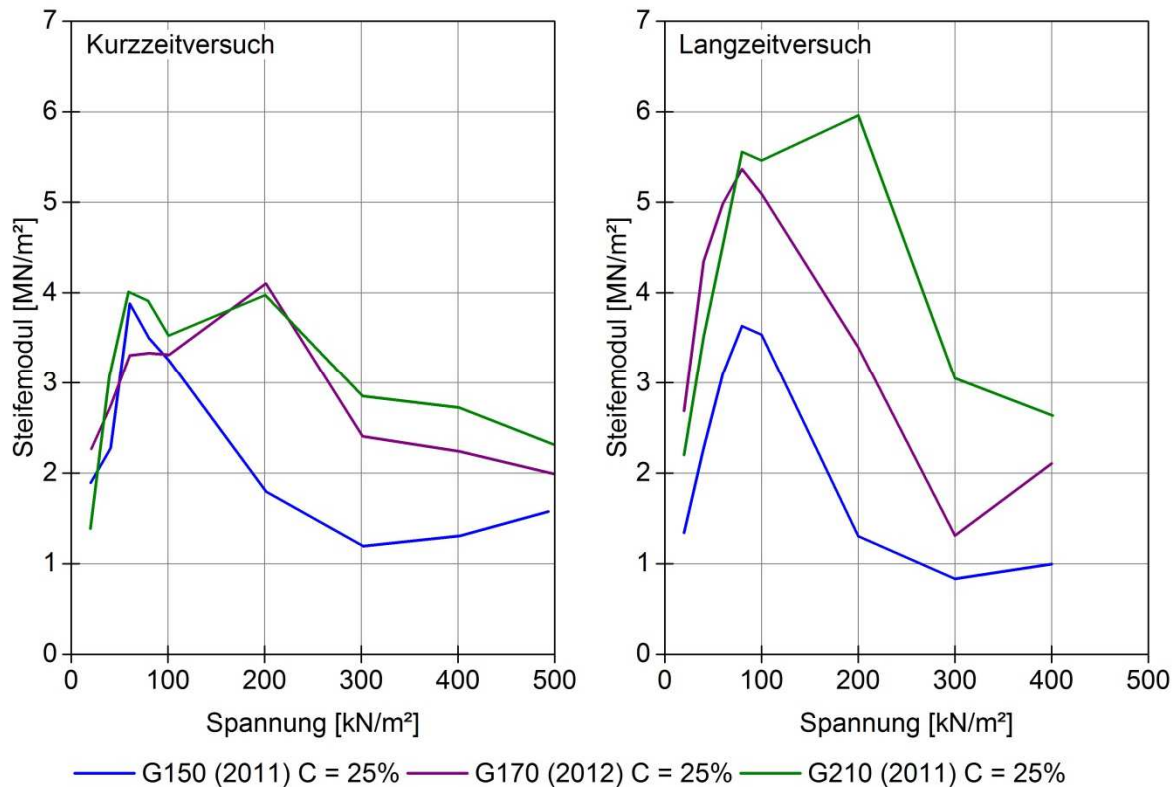


Abbildung 3-63: Vergleich der Steifemoduln  $E_{S1}$  Kurzzeit – Langzeit-Kompressionsversuch; Oedometerquerschnitt 500 mm x 500 mm

### 3.3.10 Scherversuche im Rahmenschergerät – TU Freiberg

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Rahmenscherversuche dargestellt, die im Jahr 2011 an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg mit dem Produkt Perimeter 50 (Schüttdichte  $\sim 170 \text{ kg/m}^3$ ) durchgeführt wurden.

#### 3.3.10.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche erfolgten in einem Scherrahmen mit einer Grundfläche von 437 mm x 437 mm und einer Höhe von 200 mm. Für eine möglichst gleichmäßige Einleitung der Scherkräfte wurden entsprechende Gitter an der Ober- und Unterseite der Probe eingelegt. Mit Hilfe eines Aufsetzrahmens wurde das Material 26 cm hoch in den Scherrahmen eingefüllt und anschließend bis zum Erreichen einer Schichthöhe von 20 cm verdichtet. Dies entspricht einer Verdichtung von  $C = 23\%$ . Die Verdichtung der Proben erfolgte mit einer elektrisch betriebenen Rüttelplatte.



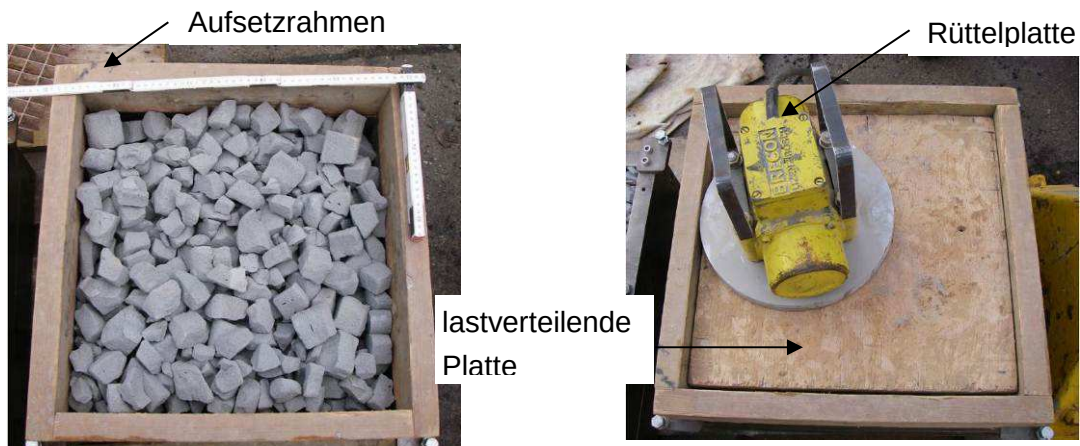


Abbildung 3-64: Einbau des Probenmaterials [Szczyrba 2011]

Für die Ermittlung der Scherparameter  $\phi$  und  $c$  wurden 6 Scherversuche mit einer Normalspannung von  $\sigma = 25, 50, 100, 200$  und  $300 \text{ kN/m}^2$  durchgeführt, wobei der Scherversuch mit einer Normalspannung von  $100 \text{ kN/m}^2$  zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse einmal wiederholt wurde.

### 3.3.10.2 Auswertung und Ergebnisse

Für die Auswertung der Scherversuche wurden die Schubspannungen in Abhängigkeit des Scherweges dargestellt (s. Abbildung 3-65) und je Scherversuch der Spitzenwert der Schubspannung ermittelt. Anhand der Spitzenwerte der Schubspannungen und der zugehörigen Normalspannungen wurde die Bruchgerade abgeleitet (s. Abbildung 3-66).

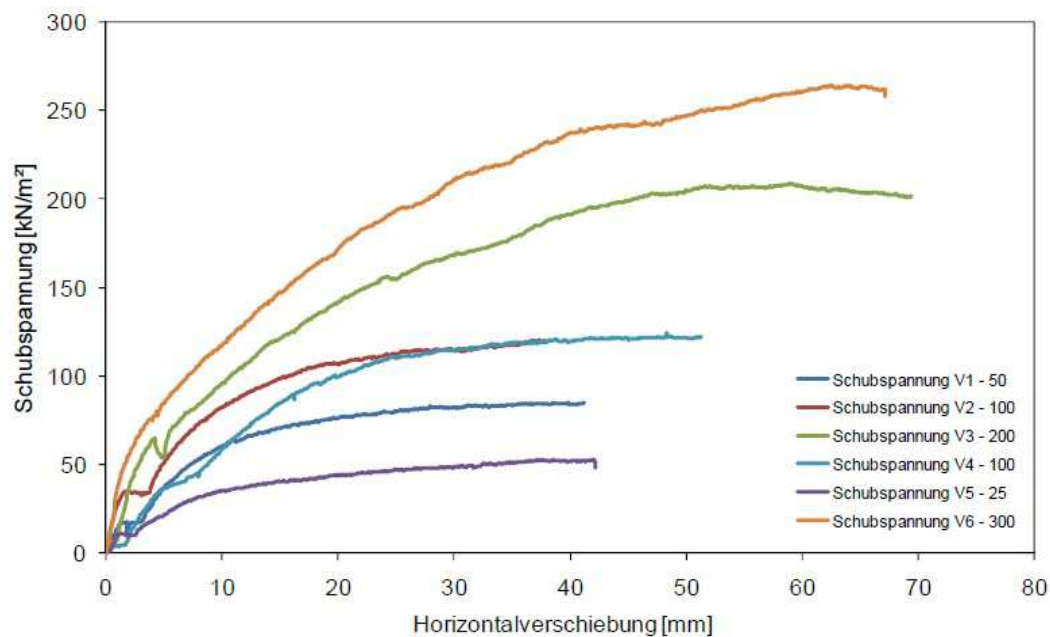


Abbildung 3-65: Verläufe der Schubspannungen [Szczyrba, 2011]

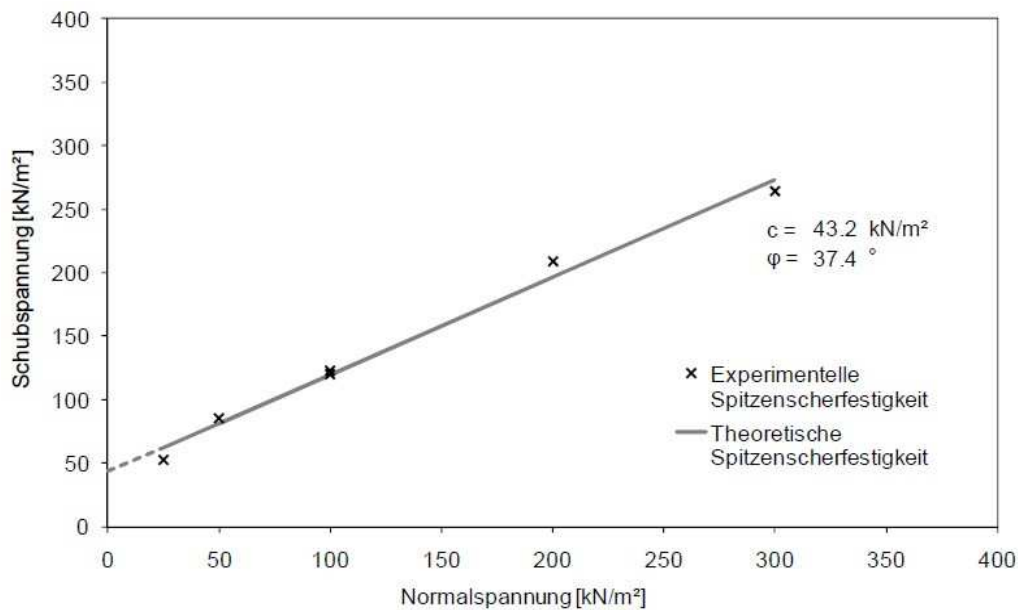


Abbildung 3-66: Bestimmung der Scherparameter anhand der Bruchgerade [Szczyrba 2011]

Die Auswertung der Bruchgerade ergab

- einen Reibungswinkel von  $\varphi = 43,2^\circ$  und
- eine Kohäsion von  $c = 43,2 \text{ kN/m}^2$ ,

wobei die ermittelte Kohäsion  $c$  auf die Verzahnung der Körner zurückzuführen ist.

Im Bericht zu den Scherversuchen der TU Freiberg wurde noch Folgendes angemerkt (Auszug):

„Aufgrund der starken Verkipfung der Lastplatte mussten die Versuche mehrmals gestoppt werden und die Daten nachträglich aus den unterschiedlichen Teilversuchen zusammengefügt werden.“ [Szczyrba 2011, S. 4] Weiter Informationen zu den oben beschriebenen Phänomenen sind im Bericht nicht enthalten.

### 3.3.11 Scherversuche im Rahmenschergerät – TU Wien

Im Jahr 2013 wurde im Erdbaulaboratorium des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Wien ein Großrahmenschergerät in Betrieb genommen. Der untere Scherrahmen besitzt eine Grundfläche von 600 mm x 500 mm und eine Höhe von 100 mm, der obere Scherrahmen eine Grundfläche von 500 mm x 500 mm und eine Höhe von 100 mm. Somit ist der untere Scherrahmen in Scherrichtung um 100 mm länger als der obere Scherrahmen, wodurch es während des Schervorganges zu keiner Reduktion der Scherfläche innerhalb der Probe kommt.

#### 3.3.11.1 Versuchsdurchführung

Der Einbau der Probe erfolgte wie in Kapitel 3.3.7 beschrieben. Für eine möglichst gleichmäßige Einleitung der Scherkräfte an der Ober- und Unterseite der Probe wurden entsprechende Gitter eingelegt.

Die Scherversuche wurden mit konstanten Normalspannungen von  $\sigma = 10, 60$  und  $100 \text{ kN/m}^2$  durchgeführt. Die Schergeschwindigkeit betrug  $0,1 \text{ mm/min}$ . Während des Schervorganges wurden die Scherspannungen und die einhergehenden vertikalen Normalverformungen der Proben kontinuierlich aufgezeichnet. Alle Scherversuche wurden mit dem Material des Typs G150 (2011) und einer Verdichtung von  $C = 25\%$  durchgeführt.

### 3.3.11.2 Auswertung und Ergebnisse

In Abbildung 3-67 ist je Scherversuch die Scherspannung in Abhängigkeit von der Scherverformung (= Scherweg) und die Normalverformung in Abhängigkeit von der Scherverformung dargestellt. Beim Scherversuch mit einer Normalspannung von  $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$  kam es bei einer Scherverformung von  $58 \text{ mm}$  zu einem geringen Abfall der Scherspannung. Danach musste der Versuch abgebrochen werden, da es zum Kippen jener Platte kam, welche die Normalspannungen  $\sigma$  auf die Probenoberseite übertragen. Das Kippen jener Platte führte dazu, dass sich diese im oberen Scherrahmen verkeilten (s. Abbildung 3-67 oben). Der Scherspannungsverlauf für  $\sigma = 60 \text{ kN/m}^2$  zeigt ab einer Scherverformung von  $80 \text{ mm}$  ein horizontales Plateau, was einem Scherversagen der Probe entspricht. Der Scherspannungsverlauf für  $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$  steigt ab einer Scherverformung von  $60 \text{ mm}$  stetig bis zum Versuchsende an.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es nur beim Scherversuch mit einer Normalspannung von  $\sigma = 60 \text{ kN/m}^2$  zu einem „echten“ Scherversagen der Probe kam.

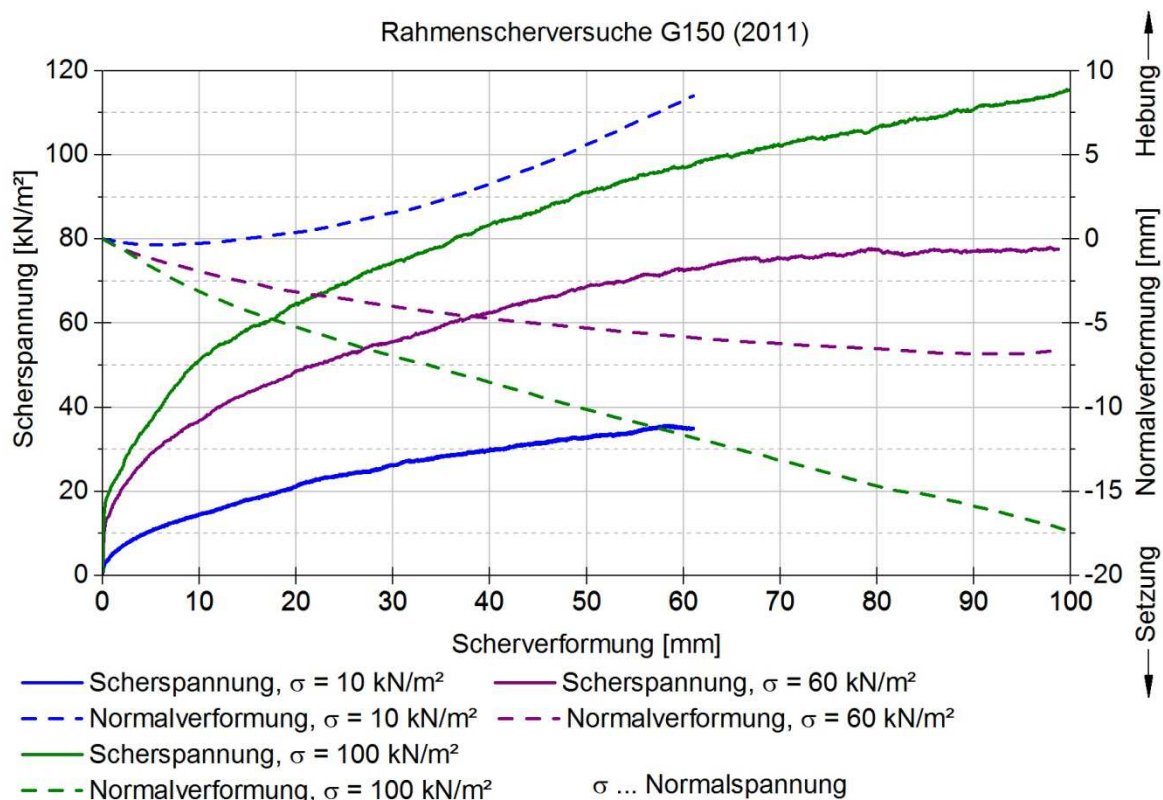
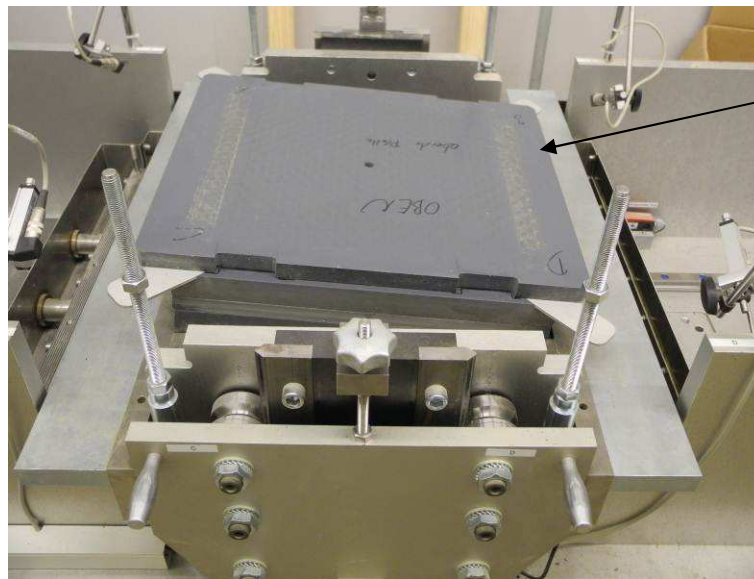


Abbildung 3-67: Scherspannungen und Normalverformungen in Abhängigkeit von der Scherverformung; Materialtyp G150 (2011), Verdichtung  $C = 25\%$



Kippen der Platte, welche die Normalspannung auf die Oberseite der Probe überträgt



Neigung der Probenoberfläche

Unterkante des oberen Scherrahmens

Abdruck der Stege des Gitters

Abbildung 3-68: Darstellung des Kippens der Platte für die Lasteinleitung (oben); Oberfläche der Probe nach dem Scherversuch mit einer Normalspannung von  $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$  (unten)

Beim Ausbau der Proben der Scherversuche zeigte sich, dass es im Zuge der Scherversuche zu einer Materialverdichtung in Scherrichtung über die gesamte Probenhöhe kam (s. Abbildung 3-69).



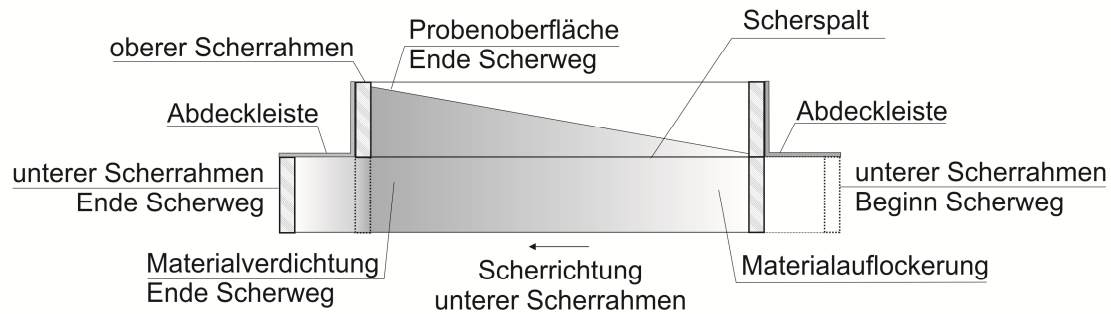


Abbildung 3-69: Materialverdichtung und Neigung der Probenoberfläche

Bedingt durch die relativ geringe einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Materialtyps G150 (2011) (s. Tabelle 3-8) drücken sich die Körner während des Scherversuches ineinander und es kommt zu keinen Relativverschiebungen der Körner im Bereich des Scherspalt (s. Abbildung 3-69), welche jedoch bei der Auswertung von Rahmenscherversuchen vorausgesetzt werden. Dies bedeutet, dass der Rahmenscherversuch zur Ermittlung der Scherparameter  $\phi$  und  $c$  für den Materialtyp G150 (2011) nicht geeignet ist.

### 3.3.12 Scherversuche im Triaxialgerät

Der Triaxialversuch dient unter anderem zur Untersuchung der Festigkeit von zylindrischen Bodenproben, welche während der Versuchsdurchführung einem räumlichen (= dreiaxialen) Spannungszustand ausgesetzt sind.

#### 3.3.12.1 Herstellung Probekörper

Mit den im Erdbaulaboratorium der TU Wien zur Verfügung stehenden Triaxialzellen können Proben mit einem Durchmesser von maximal 100 mm untersucht werden, weshalb der maximale Korndurchmesser des Probenmaterials mit 16 mm beschränkt wurde. Daher wurde die Kornverteilung der Proben, wie in Abbildung 3-70 dargestellt, entsprechend angepasst.

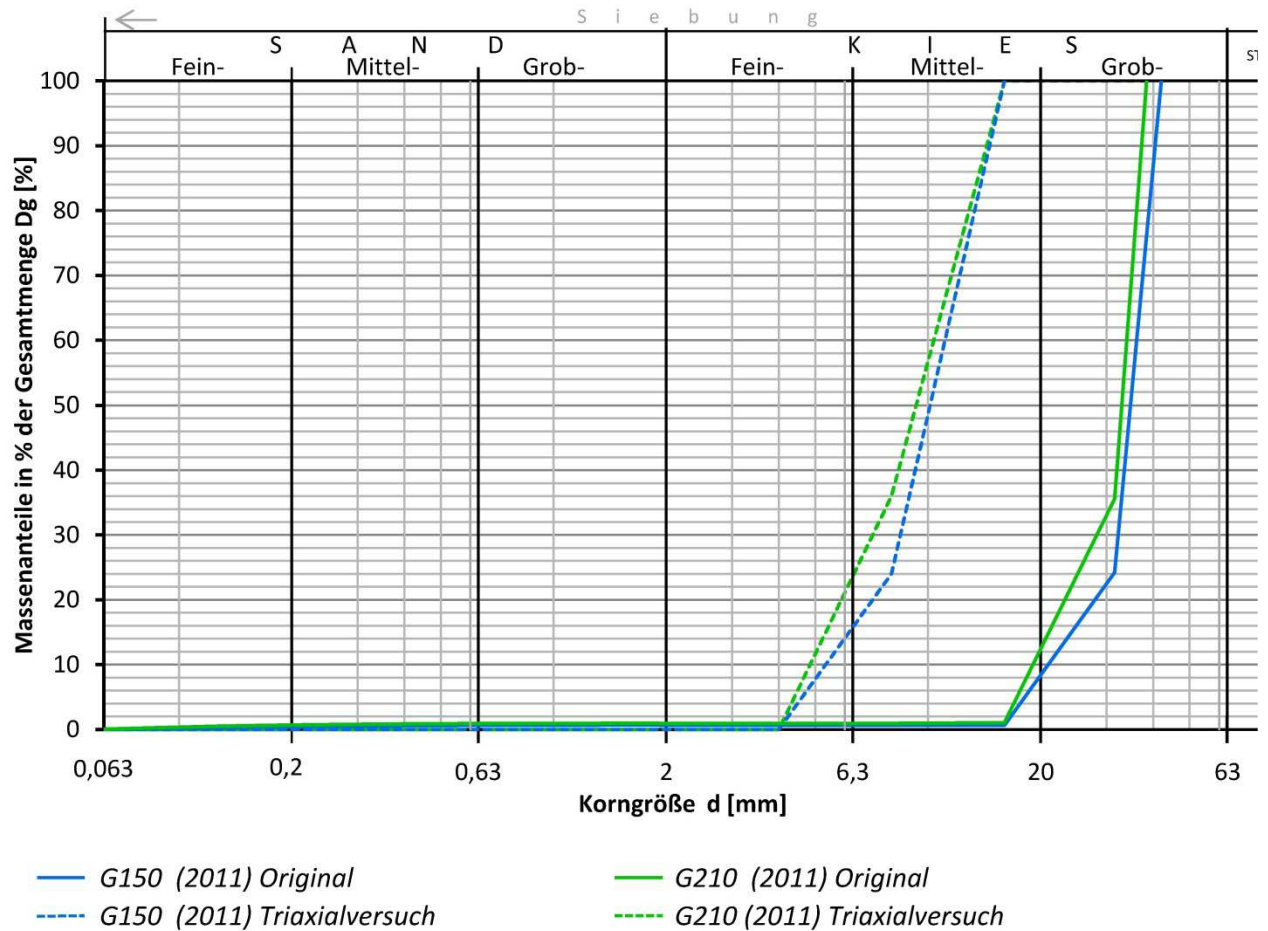


Abbildung 3-70: Kornverteilungslinien der Proben für die Triaxialversuche je Materialtyp

Die hergestellten Proben hatten einen Durchmesser von 100 mm und eine Höhe von 195 mm. Zum Schutz der Gummimembran vor den scharfkantigen Körnern der Proben wurden diese mit einem Vlies umwickelt.



Abbildung 3-71: Probekörper für die Triaxialversuche (links), Probe mit übergestülpter Gummimembran (rechts)

### 3.3.12.2 Versuchsdurchführung

Für die Ermittlung der Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  wurden je Materialtyp G150 (2011) und G210 (2011) 4 Versuche mit einer Seitenspannung von  $\sigma_3 = 0, 30, 60$  und  $120 \text{ kN/m}^2$  durchgeführt, wobei die Versuche mit einer Seitenspannung von  $\sigma_3 = 0 \text{ kN/m}^2$  einem einaxialen Druckversuch entsprechen. Zunächst wurden die Proben bis zum Abklingen der Verformungen hydrostatisch beansprucht. Danach wurden die Proben bei einer konstanten Seitenspannung  $\sigma_3$  mit einer Geschwindigkeit von 0,1% der Probenhöhe je Minute gestaucht (= Schervorgang). Während des Schervorganges wurden die für die Stauchung der Proben notwendige vertikale Spannung  $\sigma_1$  kontinuierlich aufgezeichnet.

### 3.3.12.3 Auswertung und Ergebnisse

Für die Auswertung der Versuche wurde je Probe die vertikale Spannungen  $\sigma_1$  über die vertikalen Stauchungen  $\varepsilon_1$  aufgetragen (= Arbeitslinie) und die Spannung  $\sigma_1$  beim Bruch der Proben ermittelt. Aus dem Spannungszustand beim Bruch der Proben wurden die Mohr'schen Spannungskreise für die Ermittlung der Bruchgerade(n) abgeleitet. Anhand der Bruchgerade(n) wurden die Scherparameter – der Reibungswinkel  $\varphi$  und die Verzahnungskohäsion  $c$  - bestimmt. Bei der Ermittlung der Bruchgerade zeigte sich, dass die Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  von der Normalspannung abhängig sind, folglich wurde ein bilinearer Zusammenhang gewählt (s. Abbildung 3-72 und Abbildung 3-73). Angemerkt wird, dass anstelle des bilinearen Zusammenhanges auch eine gekrümmte Versagenslinie gewählt werden könnte.



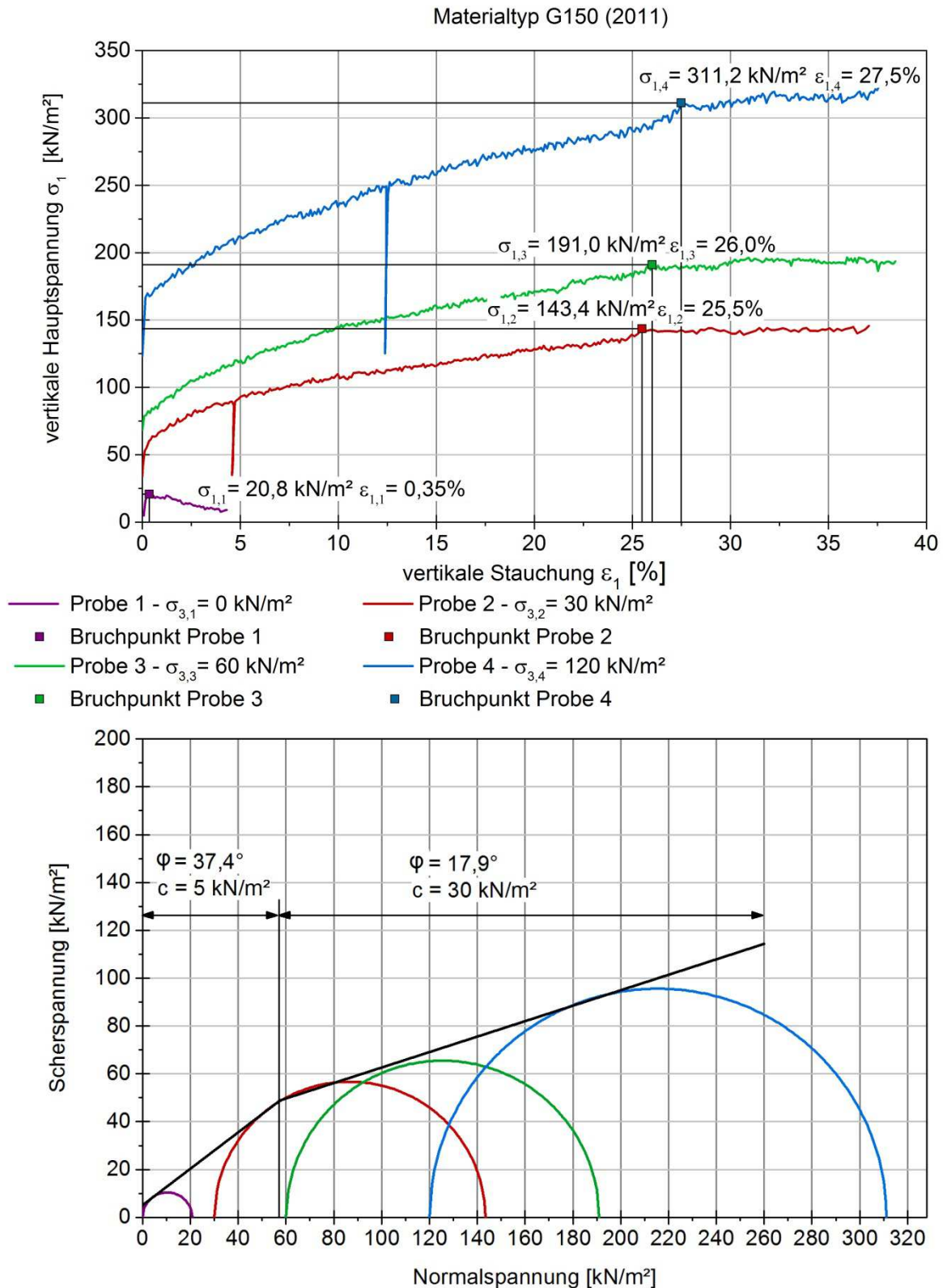


Abbildung 3-72: Oben: Entwicklung der vertikalen Hauptspannung  $\sigma_1$  in Abhängigkeit von der Stauchung  $\epsilon_1$  je Probe, Materialtyp G150 (2011)

Unten: Darstellung der Mohr'sche Spannungskreise beim Bruch der Proben des Materialtyps G150 (2011) und der von der Normalspannung abhängigen Bruchgeraden

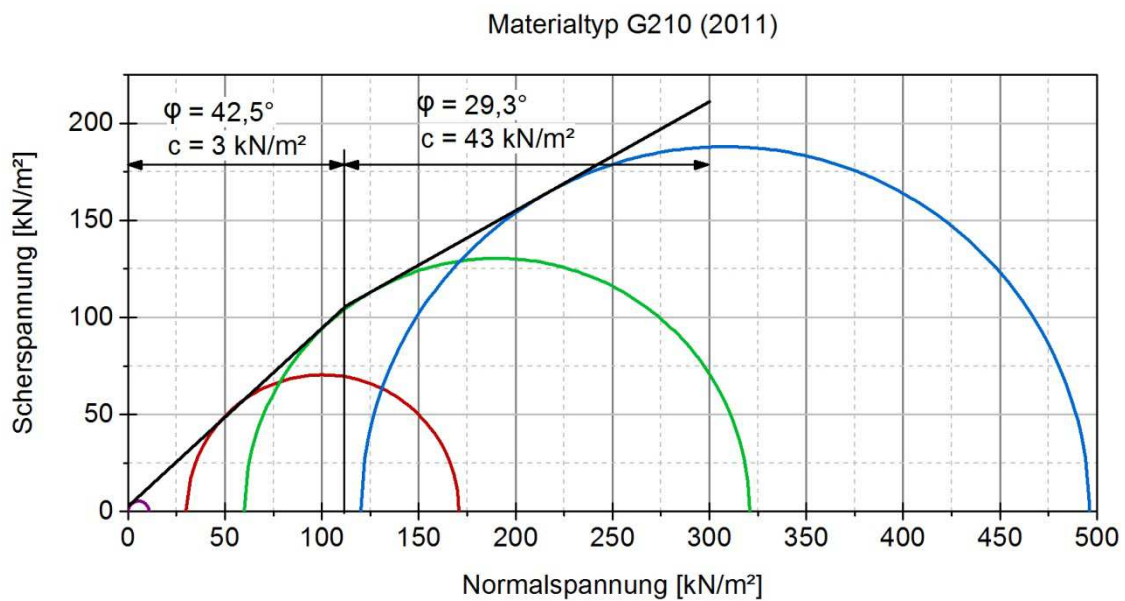
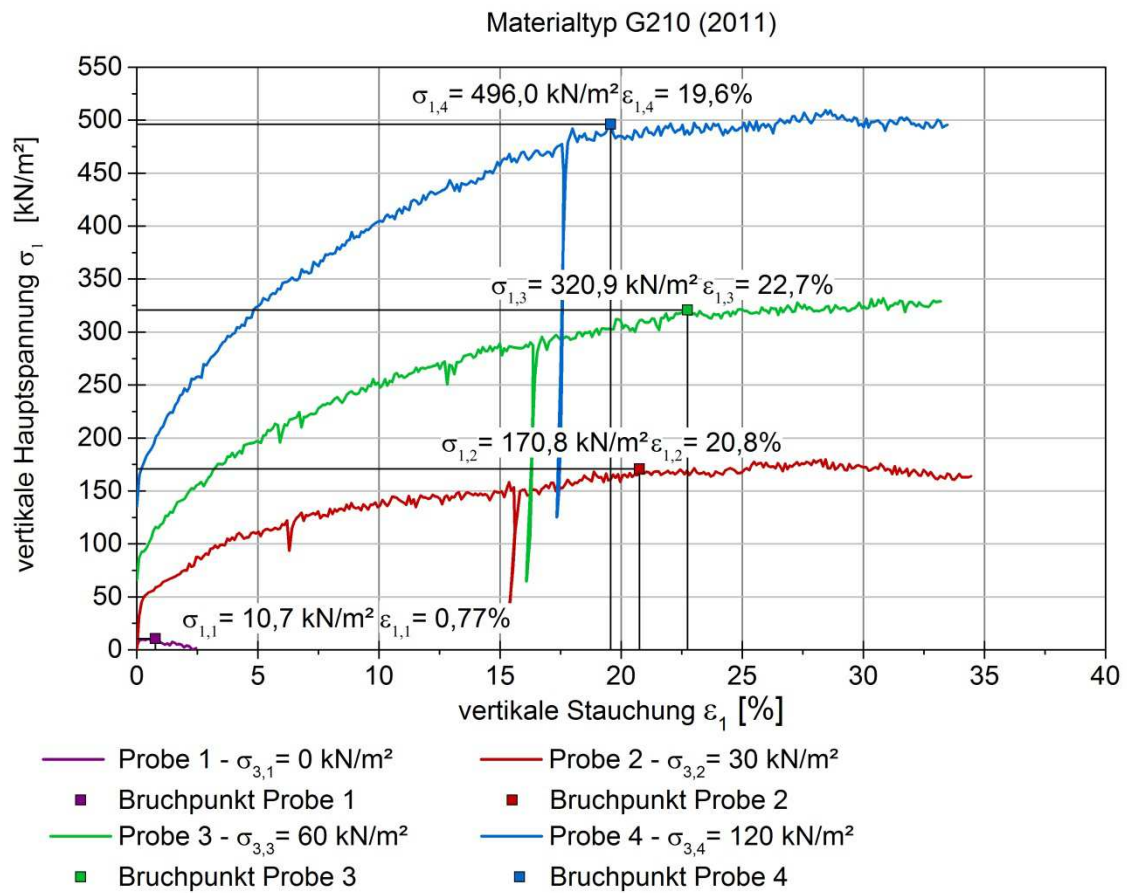


Abbildung 3-73: Oben: Entwicklung der vertikalen Hauptspannung  $\sigma_1$  in Abhängigkeit von der Stauchung je Probe, Materialtyp G210 (2011)

Unten: Darstellung der Mohr'sche Spannungskreise beim Bruch der Proben des Materialtyps G210 (2011) und der von der Normalspannung abhängigen Bruchgeraden

Tabelle 3-21: Spannungsabhängige Scherparameter der untersuchten Materialtypen

| Materialtyp | Bruchstauchung $\varepsilon_1$ [%]                  | Normalspannung              | Reibungswinkel $\varphi$ | Verzahnungskohäsion $c$ |
|-------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| G150 (2011) | (0,35) <sup>1)</sup><br>[25,5 ÷ 27,5] <sup>2)</sup> | 0 ÷ 59 kN/m <sup>2</sup>    | 37,4°                    | 5 kN/m <sup>2</sup>     |
|             |                                                     | 60 ÷ 260 kN/m <sup>2</sup>  | 17,9°                    | 30 kN/m <sup>2</sup>    |
| G210 (2011) | (0,77) <sup>1)</sup><br>[19,6 ÷ 22,7] <sup>2)</sup> | 0 ÷ 112 kN/m <sup>2</sup>   | 42,5°                    | 3 kN/m <sup>2</sup>     |
|             |                                                     | 113 ÷ 300 kN/m <sup>2</sup> | 29,3°                    | 43 kN/m <sup>2</sup>    |

<sup>1)</sup> Bruchstauchung des einaxialen Druckversuchs ( $\sigma_3 = 0$  kN/m<sup>2</sup>)

<sup>2)</sup> Bruchstauchung der Triaxialversuche ( $\sigma_3 = 30 \div 120$  kN/m<sup>2</sup>)

Bei allen Proben stellt sich ein Versagensmechanismus ein, der durch einen Fließzustand gekennzeichnet ist, wobei die Stauchungen  $\varepsilon_1$  zunehmen, die Spannungen  $\sigma_1$  aber nicht weiter gesteigert werden können. Der Versagensmechanismus beruht somit auf einem duktilen Materialverhalten (s. Abbildung 3-72 und Abbildung 3-73).

Abbildung 3-74 zeigt die Arbeitslinien von grobkörnigen Bodenproben (enggestufter sandiger Kies = sa Gr). Die Bruchstauchungen  $\varepsilon_1$  der einzelnen Bodenproben liegen in einer Bandbreite von  $\varepsilon_1 = 0,40 \div 1,30\%$  und sind um ein Vielfaches kleiner, als jene der GSG – Proben. Abbildung 3-75 zeigt die Bruchgerade der sandigen Kiesprobe.

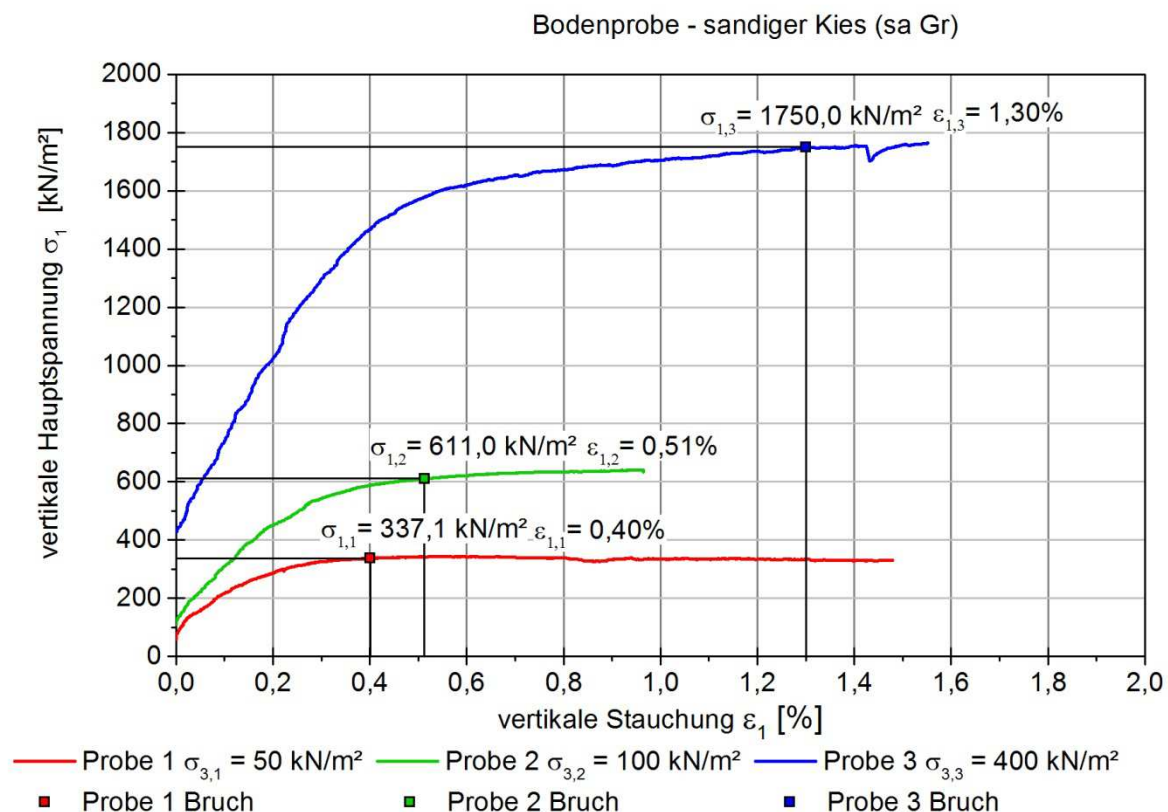


Abbildung 3-74: Entwicklung der vertikalen Hauptspannung  $\sigma_1$  in Abhängigkeit von der Stauchung  $\varepsilon_1$  je Bodenprobe (sa Gr)

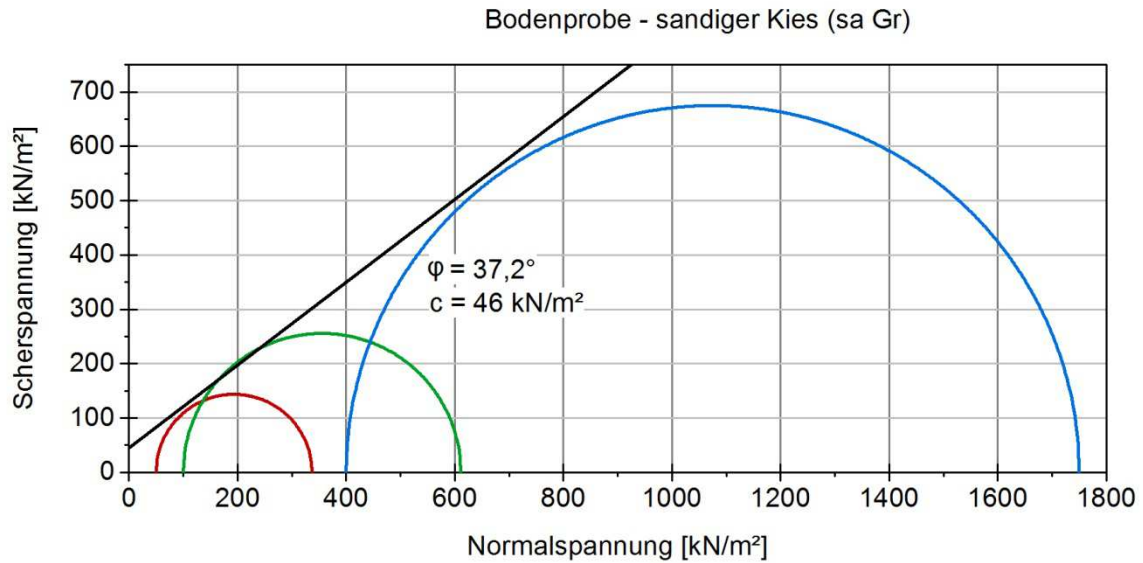


Abbildung 3-75: Darstellung der Mohr'sche Spannungskreise beim Bruch der Bodenproben (sa Gr) und der daraus abgeleiteten Bruchgeraden

Im Folgenden werden die Scherparameter  $\varphi_{\text{red}}$  und  $c_{\text{red}}$  der GSG-Proben zufolge einer teilweisen Mobilisierung der Scherspannungen ermittelt. Die Ermittlung der teilweise mobilisierten Scherspannungen der GSG-Proben erfolgt auf Basis des Mittelwertes der Bruchstauchungen der Bodenproben  $\varepsilon_{\text{m,Boden}}$ .

$$\varepsilon_{\text{m,Boden}} = \frac{\varepsilon_{1,1} + \varepsilon_{1,2} + \varepsilon_{1,3}}{3} = \frac{0,40 + 0,51 + 1,30}{3} = 0,74\% \quad (3-22)$$

In weiterer Folge werden nun die zur Stauchung  $\varepsilon_{\text{m,Boden}}$  zugehörigen Hauptspannungen  $\sigma_1$  anhand der Arbeitslinien der GSG – Proben ermittelt. Dies ist in Abbildung 3-76 für die Proben des Materialtyps G150 (2011) exemplarisch dargestellt.

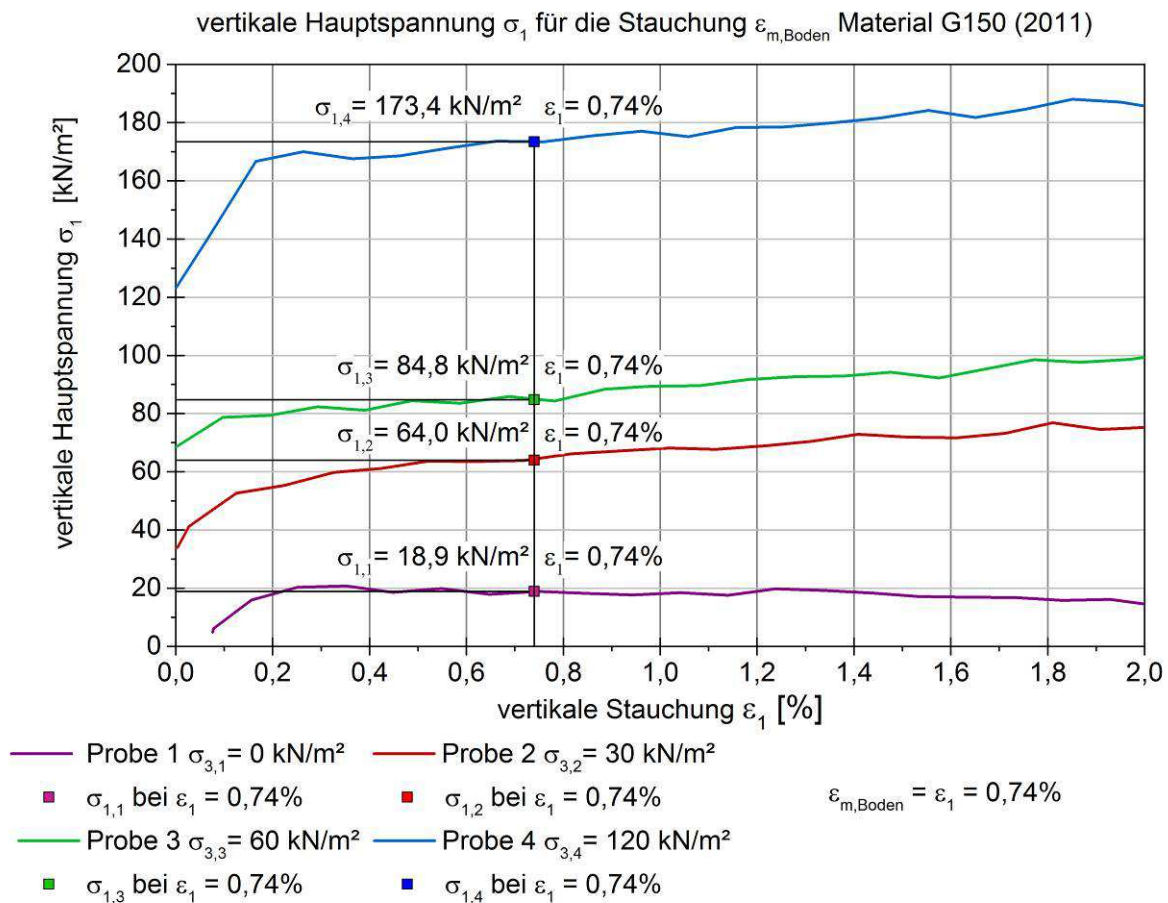
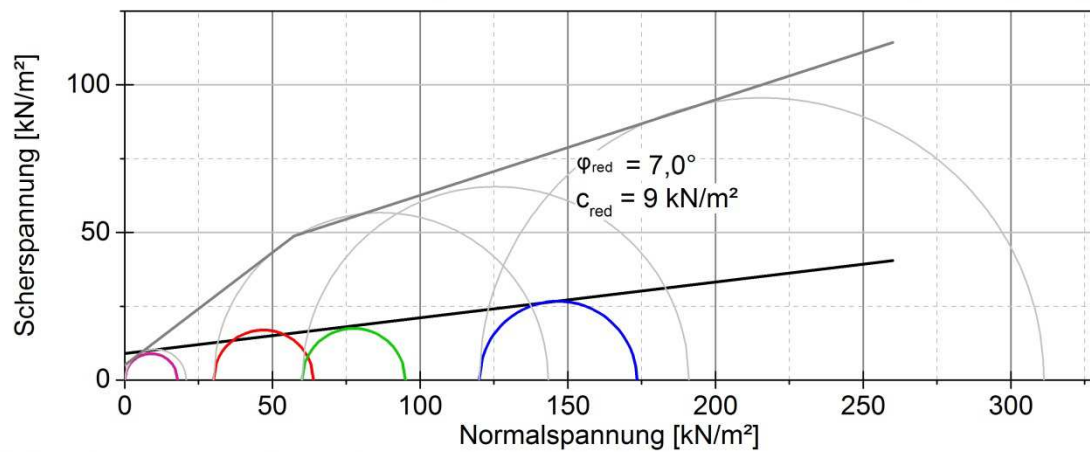


Abbildung 3-76: Vertikale Hauptspannung  $\sigma_1$  bei einer Stauchung  $\varepsilon_{m,Boden}$  der Triaxialproben des Materialtyps G150 (2011)

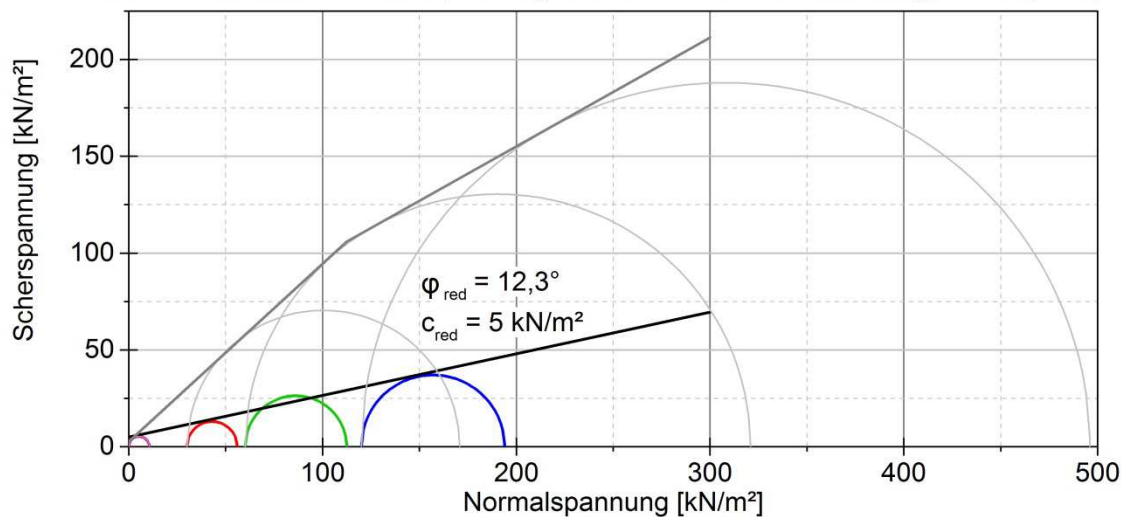
Die in Abbildung 3-76 ermittelten Hauptspannungen  $\sigma_1$  der GSG-Proben sind somit verformungskompatibel mit der mittleren Bruchstauchung  $\varepsilon_{m,Boden}$  der Bodenproben.



teilweise mobilisierte Scherspannungen der GSG-Proben - Materialtyp G150 (2011)



teilweise mobilisierte Scherspannungen der GSG-Proben - Materialtyp G210 (2011)



- Mohr'sche Spannungskreise beim Bruch der GSG - Proben
- Bruchgerade von GSG zufolge der vollständigen Mobilisierung der Scherspannung
- Mohr'sche Spannungskreise der GSG-Proben zufolge der Berücksichtigung der  
Verformungskompatibilität mit der Bodenprobe (sa Gr)
- mobilisierte Scherfestigkeit zufolge einer Scherdehnung von  $\varepsilon_1 = 0,74\%$

Abbildung 3-77: Mobilisierte Scherspannungen der Materialtypen G150 (2011) und G210 (2011) bei Berücksichtigung der Verformungskompatibilität zwischen GSG und der Bodenprobe (sa Gr)

*Tabelle 3-22: Vergleich der Scherparameter in Abhängigkeit von der Mobilisierung*

| Materialtyp | Normalspannung                  | vollständige Mobilisierung <sup>1)</sup> |                        | teilweise Mobilisierung <sup>2)</sup> |                                |
|-------------|---------------------------------|------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|             | $\sigma_n$ [kN/m <sup>2</sup> ] | $\varphi$ [°]                            | c [kN/m <sup>2</sup> ] | $\varphi_{red}$ [°]                   | $c_{red}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
| G150 (2011) | 0 ÷ 58                          | 37,4                                     | 5                      | 7,0                                   | 9                              |
|             | 59 ÷ 260                        | 17,9                                     | 30                     |                                       |                                |
| G210 (2012) | 0 ÷ 112                         | 42,5                                     | 3                      | 12,3                                  | 5                              |
|             | 113 ÷ 300                       | 29,3                                     | 43                     |                                       |                                |

<sup>1)</sup> Bruch der GSG-Proben

<sup>2)</sup> Berücksichtigung der Verformungskompatibilität zwischen der enggestuften sandigen Kiesprobe und GSG bei einer Scherdehnung von  $\epsilon_1 = 0,74\%$

Die Berücksichtigung der Verformungskompatibilität zwischen den GSG-Proben und der Bodenprobe führt zu einer deutlichen Reduktion der mobilisierten Scherparameter von GSG (s. Tabelle 3-22).

### **3.3.13 Bestimmung der Kornverfeinerung**

Anhand der folgenden beschriebenen Versuche wird die Neigung zur Kornverfeinerung zufolge einer definierten Beanspruchung untersucht.

#### **3.3.13.1 Versuchsdurchführung**

Zu Beginn des Versuchs wurden die einzelnen Körner der Proben möglichst kompakt per Hand in den Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm und einer Höhe von 200 mm geschichtet. Danach wurde eine Stahlplatte mit einem Durchmesser von 248 mm und einer Höhe von 20 mm auf die Probenoberseite gelegt. Auf der Stahlplatte wurden 30 Stöße mit einem Proctorhammer (Fallmasse 4,5 kg und Fallhöhe 450 mm) ausgeführt, durch welche die Proben verdichtet wurden. An den verdichteten Proben wurde ein Langzeit-Kompressionsversuch mit einer maximalen Spannung von 500 kN/m<sup>2</sup> durchgeführt. Nach Beendigung der Kompressionsversuche wurden die Sieblinien der Proben ermittelt. Es wurde je Materialtypen G150 (2011), G170 (2012) und G210 (2012) 1 Versuch durchgeführt.

#### **3.3.13.2 Auswertung und Ergebnisse**

Die Auswertung erfolgt durch einen Vergleich der Sieblinien und dem zugehörigen Grobfaktor vor und nach der Beanspruchung (Tabelle 3-23 und Abbildung 3-78)



Tabelle 3-23: Grobfaktoren der Proben vor und nach der Beanspruchung

| Materialtyp | Grobfaktor vor Beanspruchung | Grobfaktor nach Beanspruchung | $\Delta$ Grobfaktor <sup>1)</sup> | $\Delta$ Grobfaktor in % <sup>2)</sup> |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| G150 (2011) | 269,7 cm <sup>2</sup>        | 203,0 cm <sup>2</sup>         | 66,7 cm <sup>2</sup>              | 25%                                    |
| G170 (2012) | 271,6 cm <sup>2</sup>        | 212,3 cm <sup>2</sup>         | 59,3 cm <sup>2</sup>              | 22%                                    |
| G210 (2012) | 265,4 cm <sup>2</sup>        | 229,9 cm <sup>2</sup>         | 35,5 cm <sup>2</sup>              | 13%                                    |

<sup>1)</sup> Differenz aus dem Grobfaktor vor und nach der Beanspruchung

<sup>2)</sup> Quotient aus  $\Delta$  Grobfaktor und Grobfaktor vor der Beanspruchung

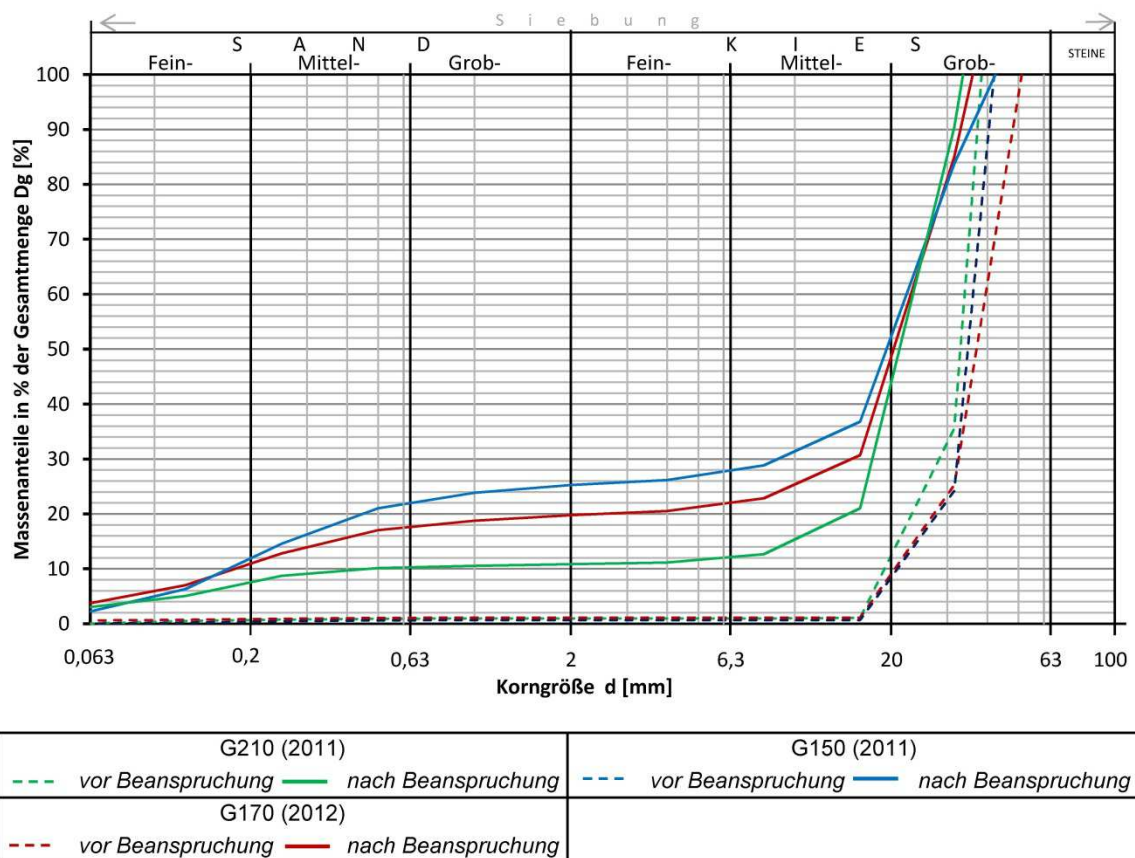


Abbildung 3-78: Kornverteilungslinien der Proben je Materialtyp vor und nach der Beanspruchung

Die Neigung zur Kornverfeinerung je Materialtyp korreliert mit der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  der Materialtypen (s. Tabelle 3-8). So besitzt das Material des Typs G150 (2011) die niedrigste einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  und den größten Anstieg des Grobfaktors (s. Tabelle 3-23).

Abbildung 3-79 zeigt die Proben nach den durchgeführten Kompressionsversuchen. Es zeigt die formschlüssige Verzahnung der Körner der Proben.



Abbildung 3-79: Proben nach der Beanspruchung – Verzahnung der Körner

### 3.3.14 Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit

#### 3.3.14.1 Versuchsdurchführung

Für die Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit des Korngemischs wurden das Probenmaterial in den Oedometer Ø250 mm geschüttet und, wie in Abschnitt 3.3.13 beschrieben, verdichtet. Danach wurde das Probenvolumen  $V_{G,C}$  bestimmt, die Probe mit einem Gewicht beschwert und der Oedometer mit Wasser gefüllt. Nach 24 Stunden wurde das Wasser aus dem Oedometer abgelassen und der Wassergehalt  $w$  der Proben bestimmt. Je Materialtyp G150 (2011), G170 (2012) und G210 (2011) wurde 1 Versuch durchgeführt.

#### 3.3.14.2 Auswertung und Ergebnisse

Der Wassergehalt  $w$  der Proben ergibt sich aus folgender Gleichung.

$$w = \frac{m_{G,f} - m_G}{m_G} = \frac{m_w}{m_G} \quad (3-23)$$

mit:

- $m_{G,f}$  Masse des feuchten Korngemischs nach der Wasserlagerung
- $m_G$  Masse des trockenen Korngemischs
- $m_w$  Masse des Wassers, welches vom Korngemisch aufgenommen wurde
- $w$  Wassergehalt des Korngemischs

Die Wasseraufnahmefähigkeit des Korngemischs in Vol.% ergibt sich zu:

$$\text{Wasseraufnahmefähigkeit} = \frac{m_w \cdot \rho_w}{V_{G,C}} \cdot 100 = \frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{G,C}} \cdot 100 \text{ in [Vol.\%]} \quad (3-24)$$

mit:

- $\rho_w$  Dichte des Wassers
- $V_{\text{Wasser}}$  Volumen des Wassers, welches vom Korngemisch aufgenommen wurde
- $V_{G,C}$  Volumen der Probe nach der Verdichtung

Die Feuchtdichte  $\rho_{G,C}$  und die Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  wird mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\rho_{G,C} = \frac{m_G + m_W}{V_{G,C}} \quad (3-25)$$

$$\rho_{d,G,C} = \frac{m_G}{V_{G,C}} \quad (3-26)$$

mit:

$m_G$  Masse des trockenen Korngemischs

$m_W$  Masse des Wassers

$V_{G,C}$  Volumen des Korngemischs nach der Verdichtung

*Tabelle 3-24: Feuchtdichte  $\rho_{G,C}$ , Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$ , Wasseraufnahmefähigkeit und Wassergehalt  $w$  je Materialtyp*

| Materialtyp | Feuchtdichte $\rho_{G,C}$ | Trockendichte $\rho_{d,G,C}$ | Wasseraufnahmefähigkeit | Wassergehalt |
|-------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|
| G150 (2011) | 0,258 g/cm <sup>3</sup>   | 0,173 g/cm <sup>3</sup>      | 8,5 Vol. %              | 49%          |
| G170 (2012) | 0,276 g/cm <sup>3</sup>   | 0,183 g/cm <sup>3</sup>      | 9,5 Vol. %              | 51%          |
| G210 (2011) | 0,277 g/cm <sup>3</sup>   | 0,159 g/cm <sup>3</sup>      | 11,8 Vol. %             | 74%          |

In Tabelle 3-24 ist die Wasseraufnahmefähigkeit je Material angeführt. Es zeigt sich, dass mit größer werdender einaxialer Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  die Wasseraufnahmefähigkeit tendenziell steigt (s. *Tabelle 3-8*). Dies lässt sich mit der unterschiedlichen Kapillarwirkung bei unterschiedlicher Porengröße innerhalb der Körner erklären, welche bei Körnern mit höherer einaxialer Druckfestigkeit im Mittel geringer ist. Eine Wasseraufnahme kann jedoch nur dann erfolgen, wenn durch Risse im Korn der an sich geschlossene Porenraum des Einzelkorns auch zugänglich ist.

### 3.3.15 Ermittlung der Durchlässigkeit

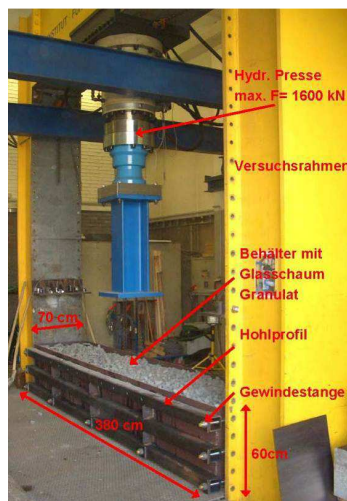
Die in Abbildung 3-34 dargestellten Sieblinien zeigen, dass die Durchlässigkeit von GSG mit jener von Drainagekies vergleichbar ist. Es ergeben sich somit Durchlässigkeitsbeiwerte von rund  $k_f = 1 \cdot 10^{-1} \div 1$  m/s.

## 3.4 Großmaßstäbliche Versuche UIBK

### 3.4.1 Grundlagen

Wie bereits in Abschnitt 2.2 dargestellt, wurden im Jahre 2008 an der Universität Innsbruck im Zuge von Vorarbeiten für das vorliegende Forschungsprojekt eine großmaßstäbliche Versuchsanordnung zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens von Glasschaum-Granulat unter Streifenfundamenten entwickelt, die folgende Anforderungen erfüllen musste:

- Abgeleitet aus den Erfahrungen in der Praxis müssen Glasschaumgranulat-Schichtdicken (verdichtet) bis zu einer Höhe von 50 cm Höhe getestet werden können.
- Prinzipiell soll mit der Versuchsanordnung das Last-Verformungsverhaltens von bis zu 2 m breiten Streifenfundamenten simuliert werden können.
- Da es unterhalb von Streifenfundamenten zu keinen Verschiebungen der Bodenschichten in Längsrichtung der Fundamente kommt (mit Ausnahme in den Anfangs- und Endbereichen), müssen innerhalb der Versuchsanordnung seitliche Querverschiebungen des Glasschaumgranulats verhindert werden.
- Unterhalb der Lasteinleitungsstruktur der Versuchsanordnung soll auf die jeweilige Glasschaumgranulatschicht eine vertikale Flächenspannung von bis zu 800 kN/m<sup>2</sup> aufgebracht werden können.



*Abbildung 3-80: Großmaßstäbliche Versuchsanordnung Universität Innsbruck*

Die entwickelte Versuchsanordnung (Abbildung 3-80) besteht aus einem nach oben offenen Behälter aus 6 mm starkem Stahlblech (S235JRG2). Der Behälter, in dem das Glasschaumgranulat eingebaut und verdichtet wird, ist 3,80 m lang, 70 cm breit und 60 cm hoch. Da die Behälterwände für die oben geforderte seitliche Unverschieblichkeit keine ausreichende Steifigkeit aufwiesen, wurden die zwei 3,80 m langen Seitenflächen durch jeweils drei an die Längswände angeschweißten Hohlprofile und durch zusätzlich eingebaute Gewindestangen ausgesteift. Die gewählte Blechstärke von 6 mm bzw. die Querschnitte der Hohlprofile und der Gewindestangen resultierten aus einer vorab durchgeführten Finite Elemente Berechnung. Auf dem Versuchsrahmen ist eine hydraulische Presse montiert, mit der die jeweils erforderliche Belastung über einen Laststempel auf die Oberfläche der Glasschaumgranulatschicht aufgebracht werden kann.

Die generelle Abfolge eines Versuches unter Verwendung der oben beschriebenen Versuchsanordnung kann wie folgt beschrieben werden:

- Einfüllen von Glasschaumgranulat in den Stahlbehälter

Beim Einfüllen wird die untere Entleerungsöffnung der „Big Bags“ mit Hilfe eines Staplers an drei Stellen (an den Enden und in der Mitte der Versuchskiste) knapp über dem Behälterboden positioniert und das Material wird schonend, ohne dabei verdichtet zu werden, geschüttet und verteilt (s. Abbildung 3-81).



*Abbildung 3-81: Einfüllen von Glasschaumgranulat in den Versuchsbehälter*

- Verdichten des Materials mittels Rüttelplatte

Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus ist der Arbeitsaufwand bei der Herstellung von GSG-Schichten (Schütten, Verdichten) für die ausführenden Firmen von besonderer Bedeutung, weshalb Fragestellungen hinsichtlich der notwendigen Verdichtung des lose geschütteten Materials, oder welche maximalen Schichtstärke in einem Arbeitsablauf hergestellt werden kann, im Zuge des Forschungsvorhabens behandelt werden sollen. Um diesbezüglich zu Erkenntnissen zu gelangen, wurden GSG-Schichten 1- bzw. 2-lagig und mit unterschiedlichen Verdichtungen (10%, 15%, 20%, 25% und 30%) eingebaut und getestet. Details zur Definition der Verdichtung können Abschnitt 3.1 entnommen werden. Auf Basis der praktischen Erfahrungen beim Einbau von GSG-Schichten seitens des Industriepartners Technopor Handels GmbH wurde für die Durchführung der großmaßstäblichen Versuche vereinbart, dass die mittels einer Rüttelplatte durchgeführte Verdichtung des Materials im Versuchsbehälter mit maximal fünf Überfahrten hergestellt werden soll.



*Abbildung 3-82: Verdichtung GSG-Schicht*



- Aufbringen der Belastung mittels Laststempel

Durch die Verwendung verschieden großer Laststempel (0,5 m und 1,0 m) wurde der Einfluss unterschiedlich großer Streifenfundamente auf das Last- Verformungsverhalten von GSG-Schichten experimentell untersucht.



*Abbildung 3-83: Einbau Laststempel*

Entsprechend der Vertriebspalette von Technopor Handels GmbH wurden Versuche für drei unterschiedlichen Produkte (siehe Abschnitt 3.1) durchgeführt, wobei Schichtstärken von 15 cm; 28 cm und 50 cm berücksichtigt wurden.

Im Zuge von durchgeführten Voruntersuchungen konnte auch festgestellt werden, dass GSG ein ausgeprägtes „Kriechverhalten“ (Verformungszunahme unter konstanter Belastung) aufweist, weshalb neben „Kurzzeitversuchen“ auch „Langzeitversuche“, bei denen die Belastung über einen längeren Zeitraum (2-3 Tage) konstant gehalten wird, durchgeführt wurden.

Insgesamt wurden innerhalb des Forschungsvorhabens 130 Kurzzeitversuche und 23 Langzeitversuche durchgeführt. Eine detaillierte Übersicht der Versuche, mit Informationen über die im Zuge der Durchführung variierten Parameter, können der *Tabelle 3-25* bzw. der *Tabelle 3-26* entnommen werden.

*Tabelle 3-25: Übersicht großmaßstäbliche Versuche Universität Innsbruck - Kurzzeitbelastung*

| Nummer | Datum      | Material    | Länge Laststempel | Schichthöhe | Einbauart | Verdichtung |
|--------|------------|-------------|-------------------|-------------|-----------|-------------|
| 1      | 21.01.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 10%         |
| 2      | 19.11.2012 | G170 (2012) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 10%         |
| 3      | 20.11.2012 | G170 (2012) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 10%         |
| 4      | 21.12.2012 | G170 (2012) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 10%         |
| 5      | 24.01.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 15%         |
| 6      | 22.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 15%         |
| 7      | 14.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 15%         |
| 8      | 01.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |
| 9      | 22.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |
| 10     | 15.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |
| 11     | 14.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |

|    |            |             |        |        |         |     |
|----|------------|-------------|--------|--------|---------|-----|
| 12 | 31.01.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 13 | 22.11.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 14 | 28.11.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 15 | 07.01.2013 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 16 | 23.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 17 | 19.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 18 | 30.11.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 19 | 10.01.2013 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 20 | 17.01.2013 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 21 | 10.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 15% |
| 22 | 20.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 15% |
| 23 | 15.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 20% |
| 24 | 20.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 20% |
| 25 | 16.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 26 | 04.12.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 27 | 07.12.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 28 | 17.12.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 29 | 02.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 10% |
| 30 | 18.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 10% |
| 31 | 03.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 15% |
| 32 | 18.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 15% |
| 33 | 03.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 20% |
| 34 | 03.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 35 | 09.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 36 | 17.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 20% |
| 37 | 13.04.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 38 | 11.12.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 39 | 06.12.2012 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 40 | 10.01.2013 | G170 (2012) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 41 | 16.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 30% |
| 42 | 17.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 43 | 21.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 15% |
| 44 | 14.04.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 15% |
| 45 | 22.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 20% |
| 46 | 22.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 47 | 30.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 48 | 31.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 15% |
| 49 | 12.04.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 20% |
| 50 | 13.04.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 51 | 23.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 1-lagig | 10% |
| 52 | 23.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 1-lagig | 15% |
| 53 | 24.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 1-lagig | 20% |
| 54 | 28.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 55 | 29.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 20% |
| 56 | 31.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 57 | 29.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 30% |



|     |            |             |        |        |         |     |
|-----|------------|-------------|--------|--------|---------|-----|
| 58  | 02.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 59  | 03.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 15% |
| 60  | 04.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 20% |
| 61  | 04.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 62  | 30.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 63  | 07.06.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 64  | 11.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 65  | 16.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 15% |
| 66  | 16.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 20% |
| 67  | 17.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 68  | 31.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 69  | 07.06.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 70  | 05.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 10% |
| 71  | 05.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 15% |
| 72  | 09.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 20% |
| 73  | 09.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 74  | 31.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 75  | 08.06.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 76  | 10.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 20% |
| 77  | 10.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 78  | 01.06.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 79  | 09.06.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 80  | 11.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 30% |
| 81  | 17.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 82  | 18.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 15% |
| 83  | 19.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 84  | 25.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 85  | 06.06.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 86  | 24.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 87  | 26.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 88  | 08.06.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 89  | 23.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 90  | 25.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 91  | 08.06.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 92  | 23.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 93  | 30.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 94  | 06.06.2011 | G150 (2011) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 95  | 06.02.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 96  | 07.02.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 97  | 08.09.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 98  | 08.09.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 99  | 20.02.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 100 | 22.02.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 101 | 11.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 102 | 12.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 103 | 12.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 104 | 25.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 105 | 31.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |

|     |            |             |        |        |         |     |
|-----|------------|-------------|--------|--------|---------|-----|
| 106 | 01.02.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 107 | 11.07.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 108 | 13.09.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 109 | 20.02.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 1-lagig | 25% |
| 110 | 17.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 111 | 18.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 112 | 18.01.2012 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 113 | 03.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 114 | 08.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 10% |
| 115 | 19.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 116 | 30.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 117 | 30.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 118 | 15.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 119 | 17.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 120 | 22.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 10% |
| 121 | 01.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 122 | 02.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 123 | 07.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 124 | 08.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 125 | 23.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 126 | 25.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 127 | 08.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 128 | 19.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 129 | 19.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |
| 130 | 20.01.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,15 m | 1-lagig | 25% |

*Tabelle 3-26: Übersicht großmaßstäbliche Versuche Universität Innsbruck - Langzeitbelastung*

| Nummer | Datum      | Material    | Länge<br>Laststempel | Schichthöhe | Einbauart | Verdichtung |
|--------|------------|-------------|----------------------|-------------|-----------|-------------|
| 1      | 21.01.2011 | G170 (2010) | 0,50 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |
| 2      | 09.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 3      | 04.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 20%         |
| 4      | 25.02.2011 | G170 (2010) | 0,50 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |
| 5      | 18.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |
| 6      | 25.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |
| 7      | 01.04.2011 | G170 (2010) | 1,00 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 8      | 15.04.2011 | G170 (2010) | 1,00 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 20%         |
| 9      | 11.03.2011 | G170 (2010) | 1,00 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |
| 10     | 09.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 20%         |
| 11     | 16.05.2011 | G150 (2011) | 0,50 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 12     | 14.06.2010 | G150 (2011) | 0,50 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 13     | 01.06.2011 | G150 (2011) | 0,50 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |
| 14     | 09.06.2010 | G150 (2011) | 0,50 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |
| 15     | 19.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 16     | 17.06.2011 | G150 (2011) | 1,00 m               | 0,28 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 17     | 27.05.2011 | G150 (2011) | 1,00 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |
| 18     | 21.06.2011 | G150 (2011) | 1,00 m               | 0,50 m      | 2-lagig   | 25%         |

|    |            |             |        |        |         |     |
|----|------------|-------------|--------|--------|---------|-----|
| 19 | 02.09.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 20 | 05.09.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,28 m | 1-lagig | 25% |
| 21 | 09.09.2011 | G210 (2011) | 0,50 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 22 | 03.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |
| 23 | 17.02.2012 | G210 (2011) | 1,00 m | 0,50 m | 2-lagig | 25% |

### 3.4.2 Kurzzeitversuche

#### 3.4.2.1 Versuchsdurchführung

Die Aufbringung der Belastung im Zuge eines Standardkurzzeitversuches erfolgt derart, dass die Belastung in Schritten von 100 kN/m<sup>2</sup> bis zu einem Wert von 800 kN/m<sup>2</sup> gesteigert wird, wobei jedoch nach jedem aufgetragenen Belastungsschritt eine fast vollständige Entlastung der GSG-Schicht bis auf ca. 10 kN/m<sup>2</sup> (maschinentechnische Erfordernis) erfolgt. Insgesamt besteht der Versuch somit aus 8 Lastzyklen, mit Belastungsmaxima von jeweils 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, und 800 kN/m<sup>2</sup> (siehe Abbildung 3-84). Maschinentechnisch wird die Belastung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 350 kN/(m<sup>2</sup>,min) aufgebracht.

#### 3.4.2.2 Ergebnisse

Im Zuge der Versuche werden sowohl die Verschiebungen des Laststempels als auch die am Laststempel aufgetragene Kraft gemessen. Auf Basis dieser Werte wird der Verformungsmodul  $E_v$  für unterschiedliche Lastniveaus im Zuge der Erstbelastung ( $E_{v1}$ ) und der Wiederbelastung ( $E_{v2}$ ) berechnet.

Bedingt durch die möglichen Aufwölbungen der Glasschaumschichtoberfläche seitlich des Laststempels handelt es sich beim ermittelten Modul aber nicht um einen Steifemodul  $E_s$ , sondern um einen Verformungsmodul  $E_v$ . Der Verformungsmodul  $E_v$  ist von den geometrischen Randbedingungen wie z.B. der GSG-Schichthöhe oder der Laststempelbreite abhängig und kann daher nicht auf andere Versuche übertragen werden.

Exemplarisch wird im Folgenden die Ermittlung der Verformungsmoduln der Erst- und Wiederbelastungen am Beispiel des Versuches mit Material vom Typ G170 (2010), einer Schichtstärke von 50 cm (2-lagig eingebaut) und einer Verdichtung von  $C = 25\%$  innerhalb der einzelnen Lastzyklen im Detail beschrieben (s. Abbildung 3-84).

Der Verformungsmodul  $E_{v1}$  im Zuge der Erstbelastung im ersten Lastzyklus, welcher sich als Sekantenmodul aus dem Last- Verformungsverhalten innerhalb des Spannungsbereichs  $\sigma = 60 \div 100$  kN/m<sup>2</sup> ableitet, wird wie folgt ermittelt:

$$E_v = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \xrightarrow{\text{z.B.}} E_{v1;100} = \frac{100 - 60}{0,006935 - 0,003872} = 13059 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \equiv 13,06 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \quad (3-27)$$

Die Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für die Spannungen  $\sigma = 100 \div 800 \text{ kN/m}^2$  werden als Sekante zwischen den Spannungsmaxima und den zugehörigen Stauchungen von zwei benachbarten Lastzyklen berechnet (s. Abbildung 3-84).

*Tabelle 3-27: Verformungsmoduln im Zuge der Erstbelastung der Lastzyklen 2 ÷ 8; Großversuch Universität Innsbruck; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010)*

|            |                      |        |                       |                       |                       |                       |                      |                      |                      |                      |
|------------|----------------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\sigma$   | [kN/m <sup>2</sup> ] | 60     | 100                   | 200                   | 300                   | 400                   | 500                  | 600                  | 700                  | 800                  |
| $\epsilon$ | [%]                  | 0,3872 | 0,6935                | 1,433                 | 2,225                 | 3,119                 | 4,155                | 5,298                | 6,618                | 8,163                |
| L          |                      | 1      |                       | 2                     | 3                     | 4                     | 5                    | 6                    | 7                    | 8                    |
| $E_v$      | [MN/m <sup>2</sup> ] |        | $E_{v1;100}$<br>13,06 | $E_{v1;200}$<br>13,52 | $E_{v1;300}$<br>12,63 | $E_{v1;400}$<br>11,19 | $E_{v1;500}$<br>9,65 | $E_{v1;600}$<br>8,75 | $E_{v1;700}$<br>7,58 | $E_{v1;800}$<br>6,47 |

$\sigma$  Normalspannung

$\epsilon$  Stauchung

L Lastzyklus

$E_v$  Verformungsmodul

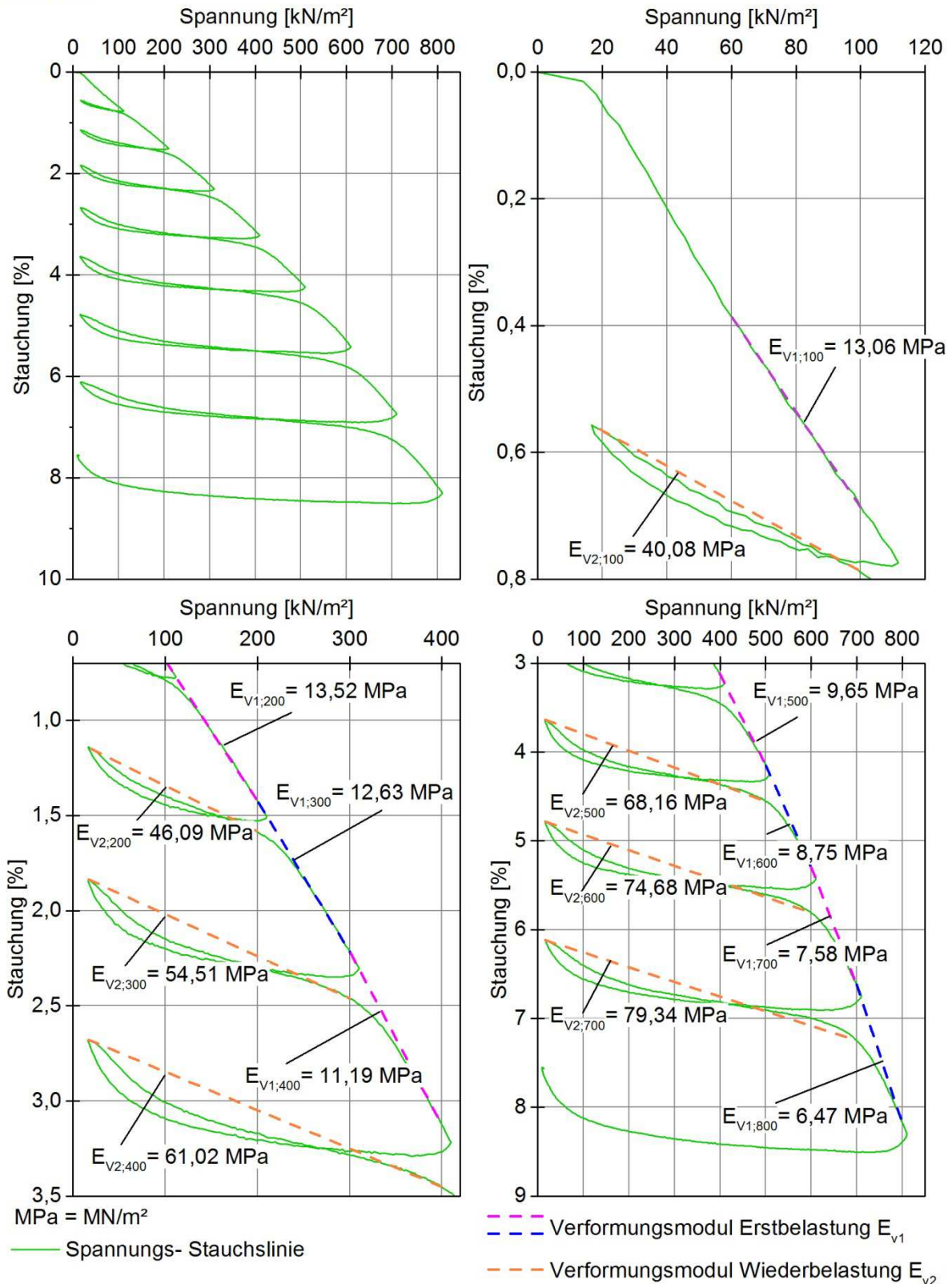


Abbildung 3-84: Bestimmung der Verformungsmoduln; Großversuch Universität Innsbruck; Belastung: Kurzzeitversuch; Materialtyp: G170 (2010), Schichthöhe 50 cm (2-lagiger Einbau), Verdichtung: 25%

Die ermittelten Verformungsmoduln der Erstbelastung  $E_{V1}$  sind in Abhängigkeit von der Spannung in Abbildung 3-85 dargestellt.

Labor: UIBK

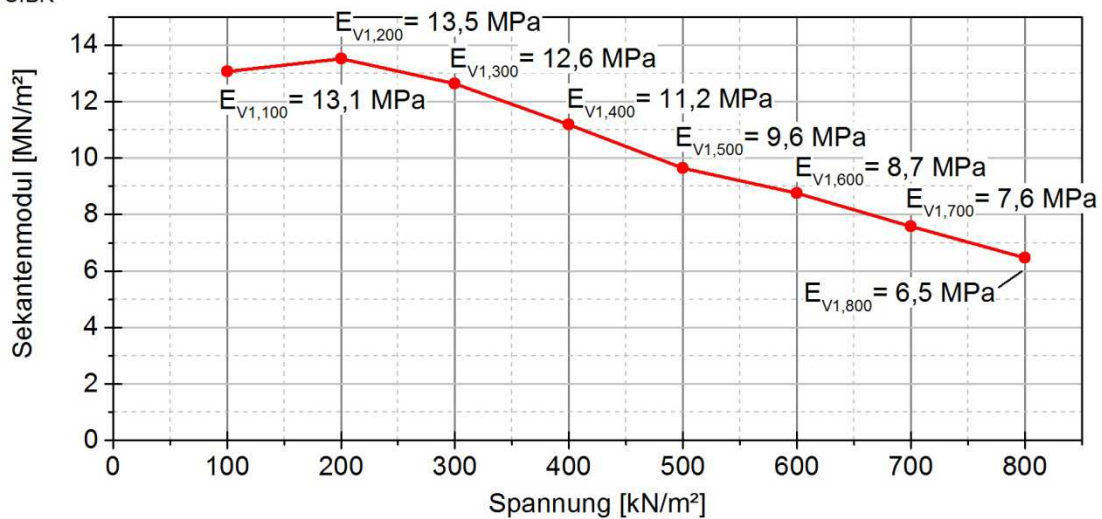


Abbildung 3-85: Verformungsmoduln im Zuge der Erstbelastung in Abhängigkeit der Spannung; Großversuch Universität Innsbruck; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010)

Aus Abbildung 3-85 ist ersichtlich, dass auch bei den großmaßstäblichen Versuchen im Bereich der niedrigen Laststufen ein Anstieg des Moduls beobachtet werden kann, was, wie bereits in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, auf verschiedene Mechanismen wie z.B. die Verdichtung C, das Materialverhalten des Einzelkornes oder den verbesserten Formschluss zwischen den Körnern zurückgeführt werden kann.

Die Bestimmung der Verformungsmoduln  $E_{V2}$  der Wiederbelastung erfolgt für jeden einzelnen Lastzyklus und leitet sich aus dem Last-Verformungsverhalten der Probe innerhalb der Lastzyklen 2 ÷ 8 ab (s. Abbildung 3-84).

Tabelle 3-28: Verformungsmoduln im Zuge der Wiederbelastung der Lastzyklen 2 ÷ 8; Großversuch Universität Innsbruck; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010)

|            |         |                       |      |                       |      |                       |      |                       |      |                       |      |                       |      |                       |      |
|------------|---------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| $\sigma$   | [kN/m²] | 20                    | 100  | 20                    | 200  | 20                    | 300  | 20                    | 400  | 20                    | 500  | 20                    | 600  | 20                    | 700  |
| $\epsilon$ | [%]     | 0,56                  | 0,78 | 1,15                  | 1,58 | 1,83                  | 2,46 | 2,68                  | 3,45 | 3,64                  | 4,55 | 4,78                  | 5,81 | 6,12                  | 7,25 |
| L          |         | 2                     |      | 3                     |      | 4                     |      | 5                     |      | 6                     |      | 7                     |      | 8                     |      |
| $E_V$      | [MN/m²] | $E_{V2;100}$<br>40,08 |      | $E_{V2;200}$<br>46,09 |      | $E_{V2;300}$<br>54,51 |      | $E_{V2;400}$<br>61,02 |      | $E_{V2;500}$<br>68,16 |      | $E_{V2;600}$<br>74,68 |      | $E_{V2;700}$<br>79,34 |      |

$\sigma$  Normalspannung

$\epsilon$  Stauchung

L Lastzyklus

$E_V$  Verformungsmodul

Die ermittelten Verformungsmoduln der Wiederbelastung  $E_{V2}$  sind in Abhängigkeit von der Spannung in auch Abbildung 3-86 dargestellt.

Labor: UIBK

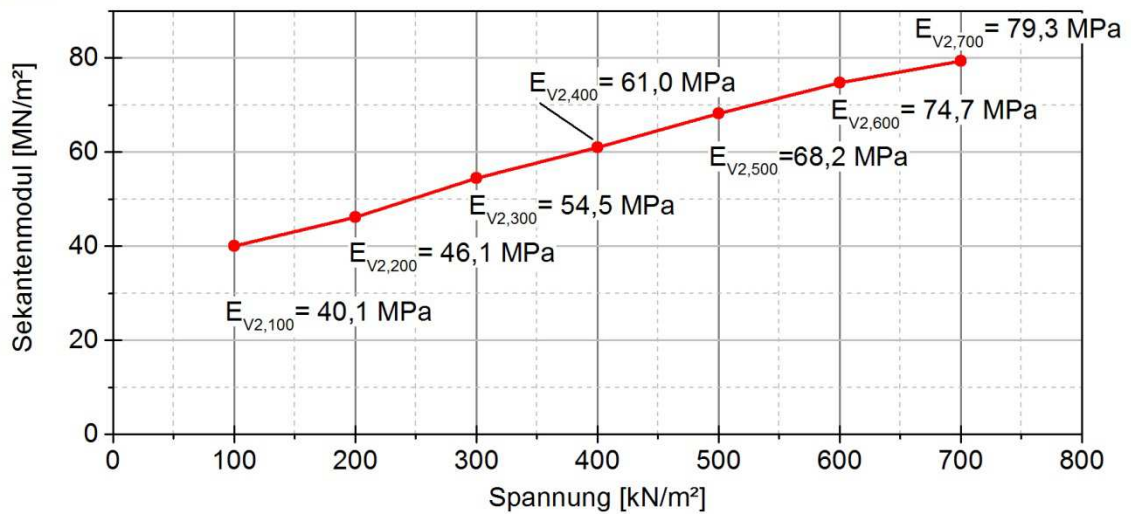


Abbildung 3-86: Verformungsmoduln im Zuge der Wiederbelastung in Abhängigkeit der Spannung; Großversuch Universität Innsbruck; Belastung: Kurzzeitversuch; Verdichtung: 25%; Materialtyp: G170 (2010)

Da für eine Gesamtbeurteilung des Materialverhaltens die Verformungsmoduln der Erstbelastung ( $E_{V1}$ ) und der Wiederbelastung ( $E_{V2}$ ) von maßgebender Bedeutung sind, erfolgt in den nachfolgenden Abbildungen die Darstellung dieser Werte für alle durchgeführten Versuche auf Basis des in Abbildung 3-85 und Abbildung 3-86 praktizierten Darstellungsschemas.



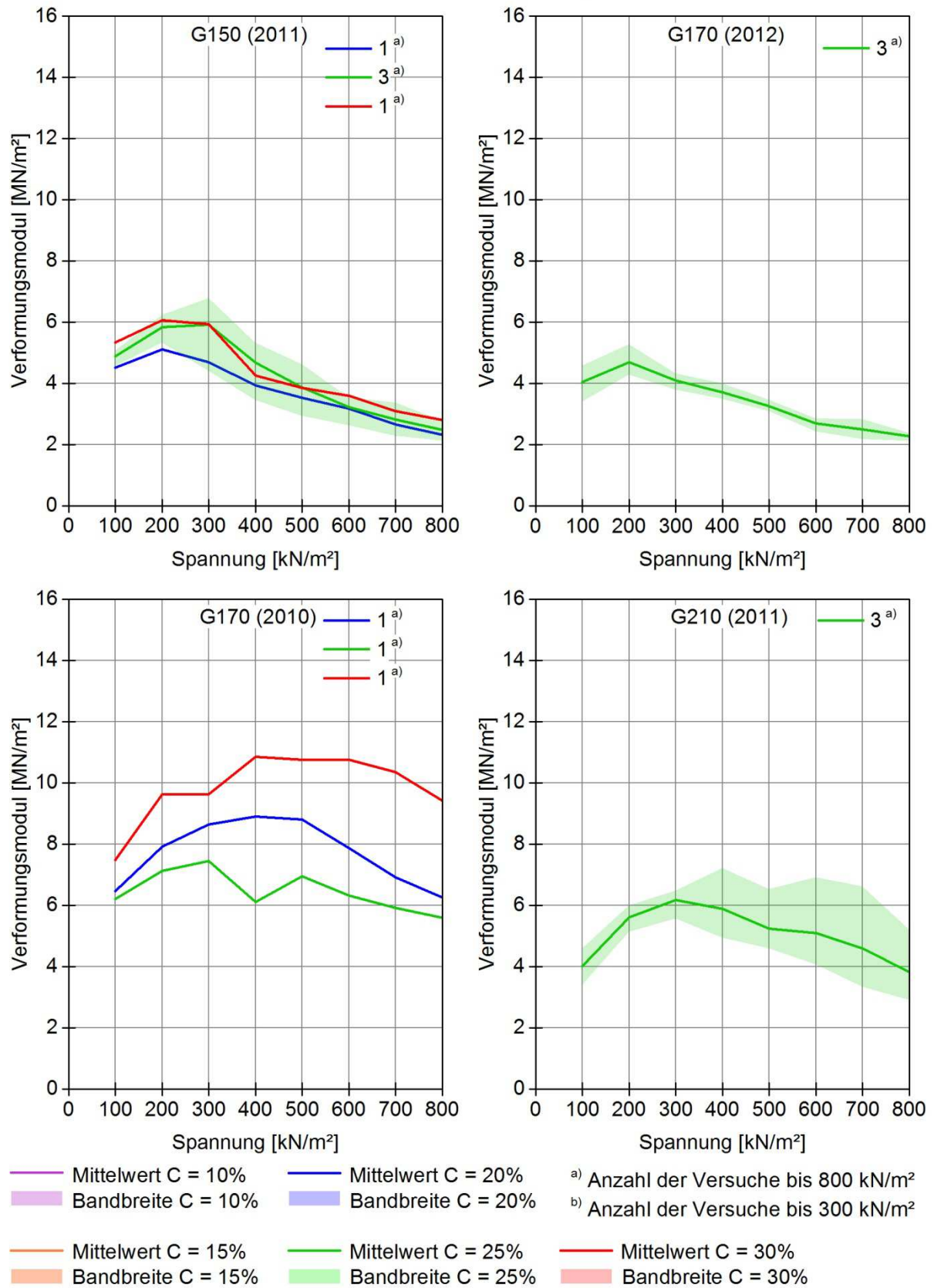


Abbildung 3-87: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 15$  cm und eine Laststempelbreite von  $FB = 50$  cm

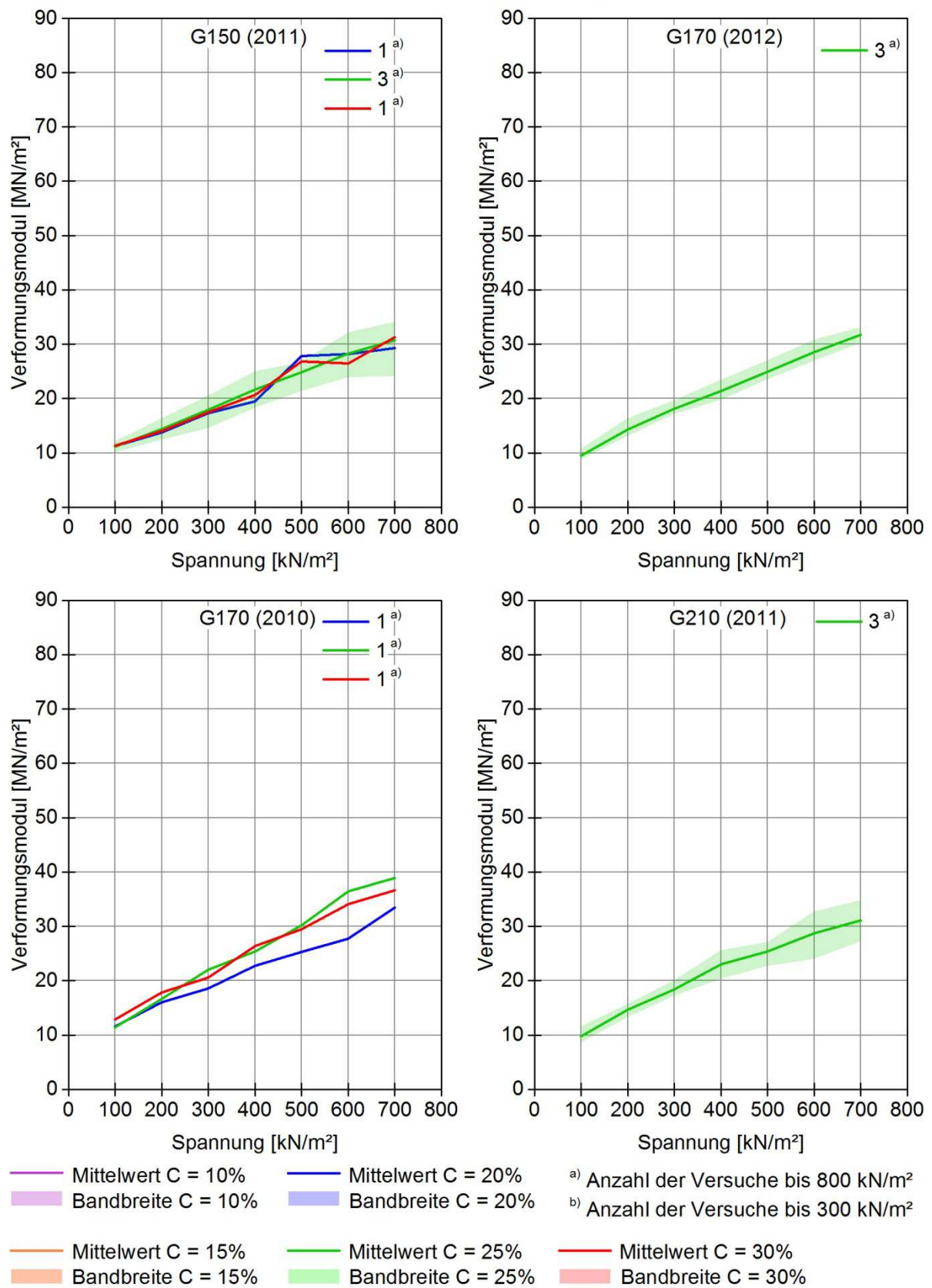


Abbildung 3-88: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 15 \text{ cm}$  und eine Laststempelbreite von  $FB = 50 \text{ cm}$

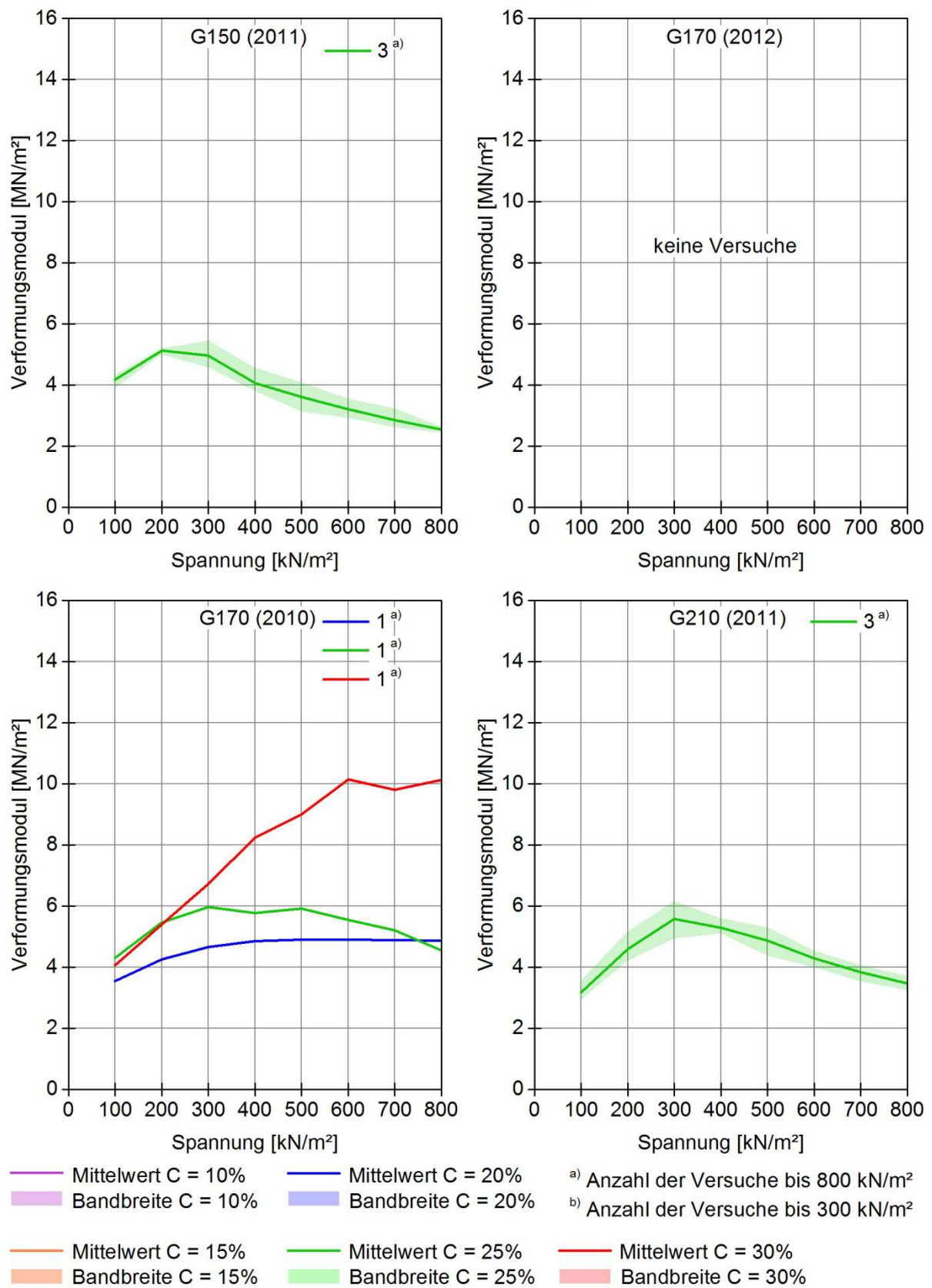


Abbildung 3-89: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 15$  cm und eine Laststempelbreite von  $FB = 100$  cm

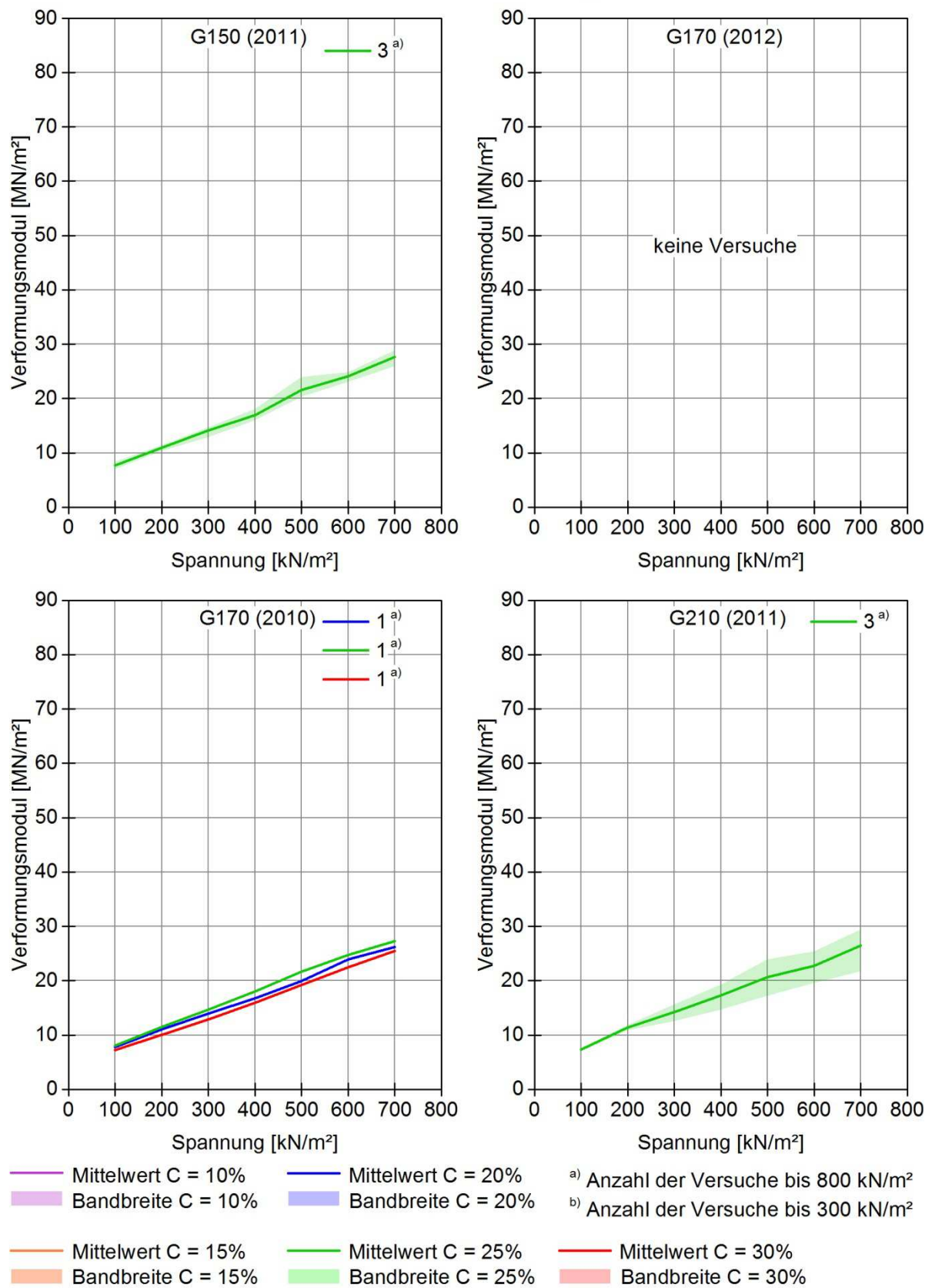


Abbildung 3-90: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 15 \text{ cm}$  und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$



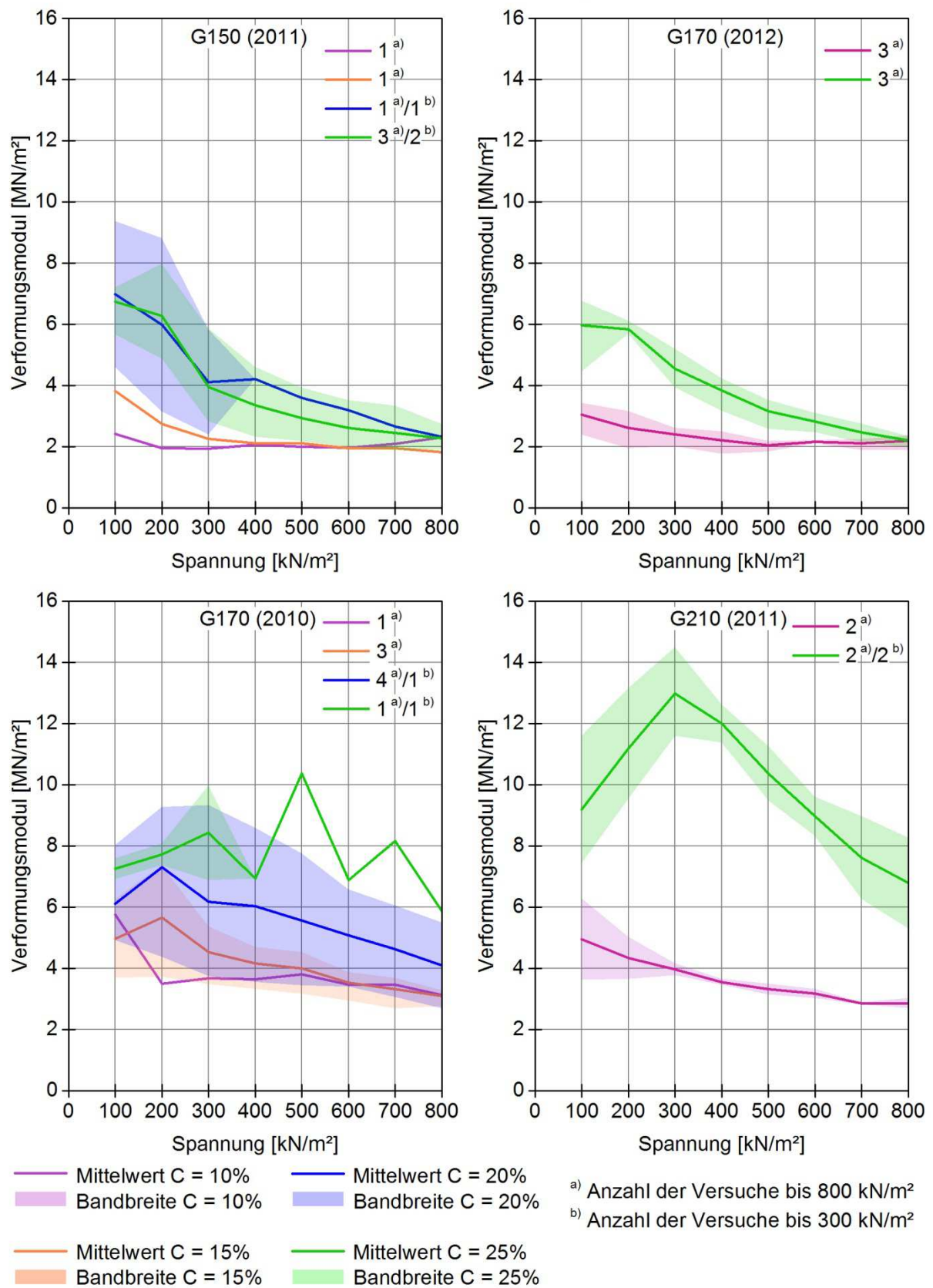


Abbildung 3-91: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 28$  cm und eine Laststempelbreite von  $FB = 50$  cm

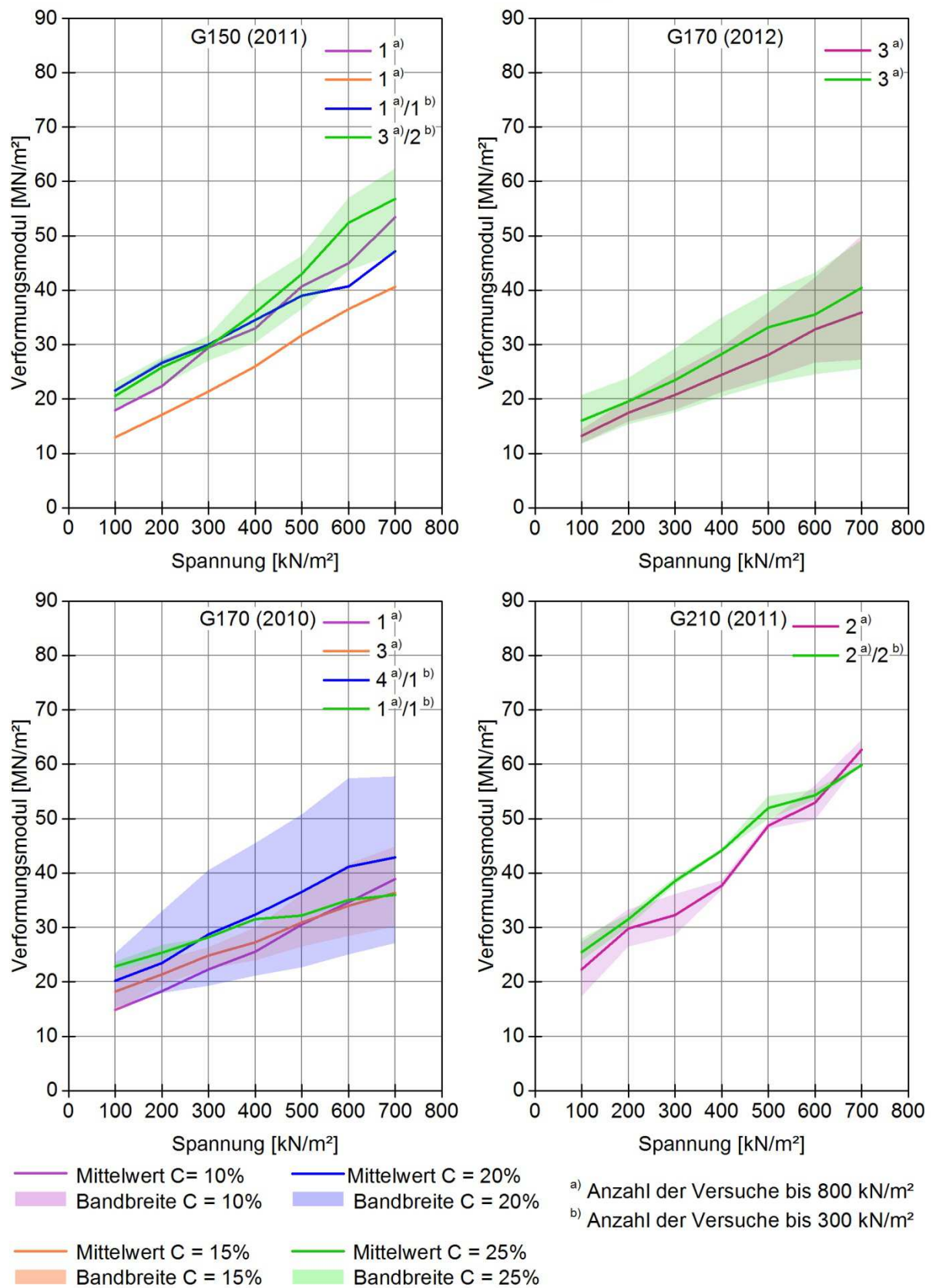


Abbildung 3-92: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 28$  cm und eine Laststempelbreite von  $FB = 50$  cm

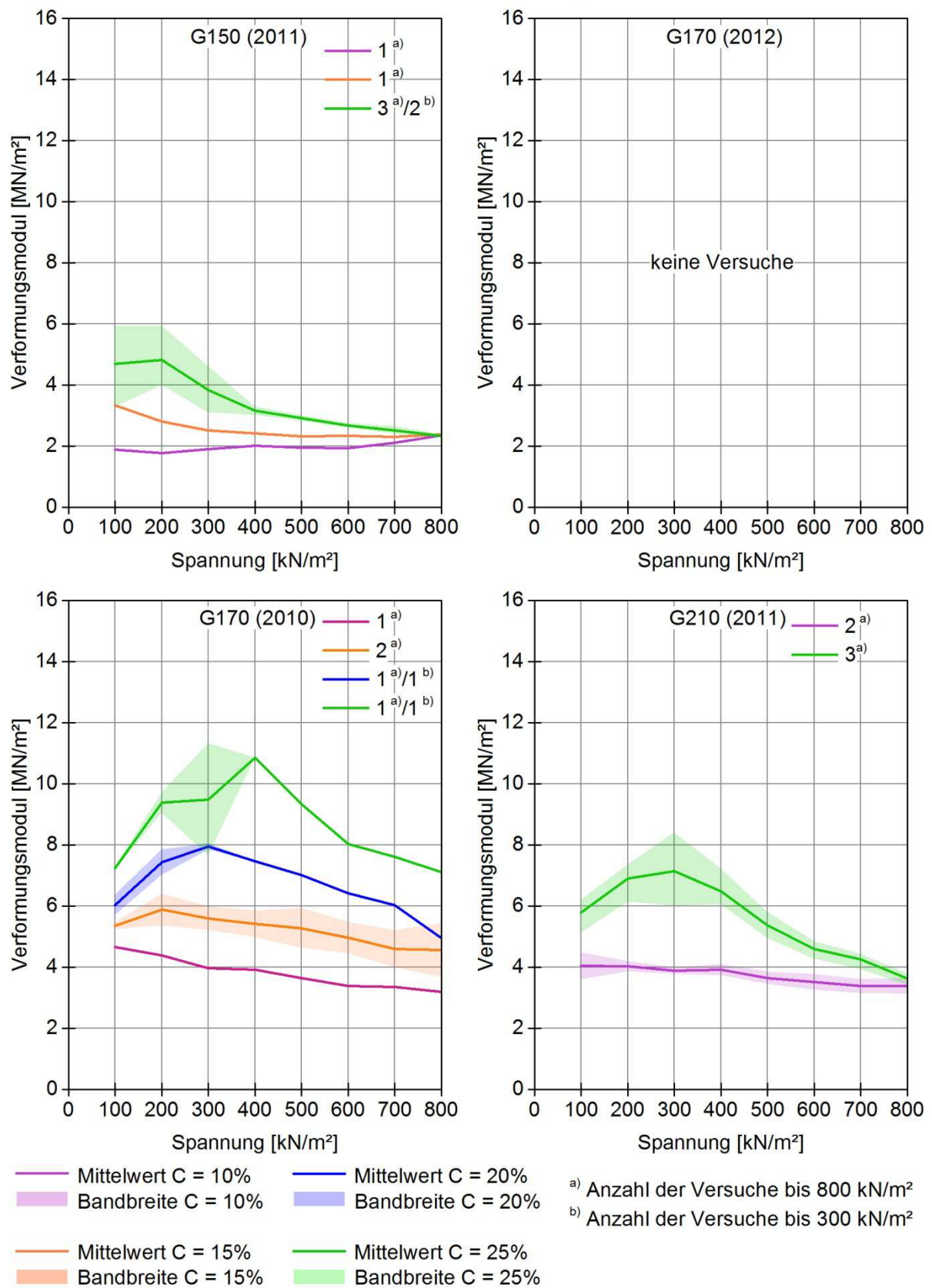


Abbildung 3-93: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 28$  cm und eine Laststempelbreite von  $FB = 100$  cm



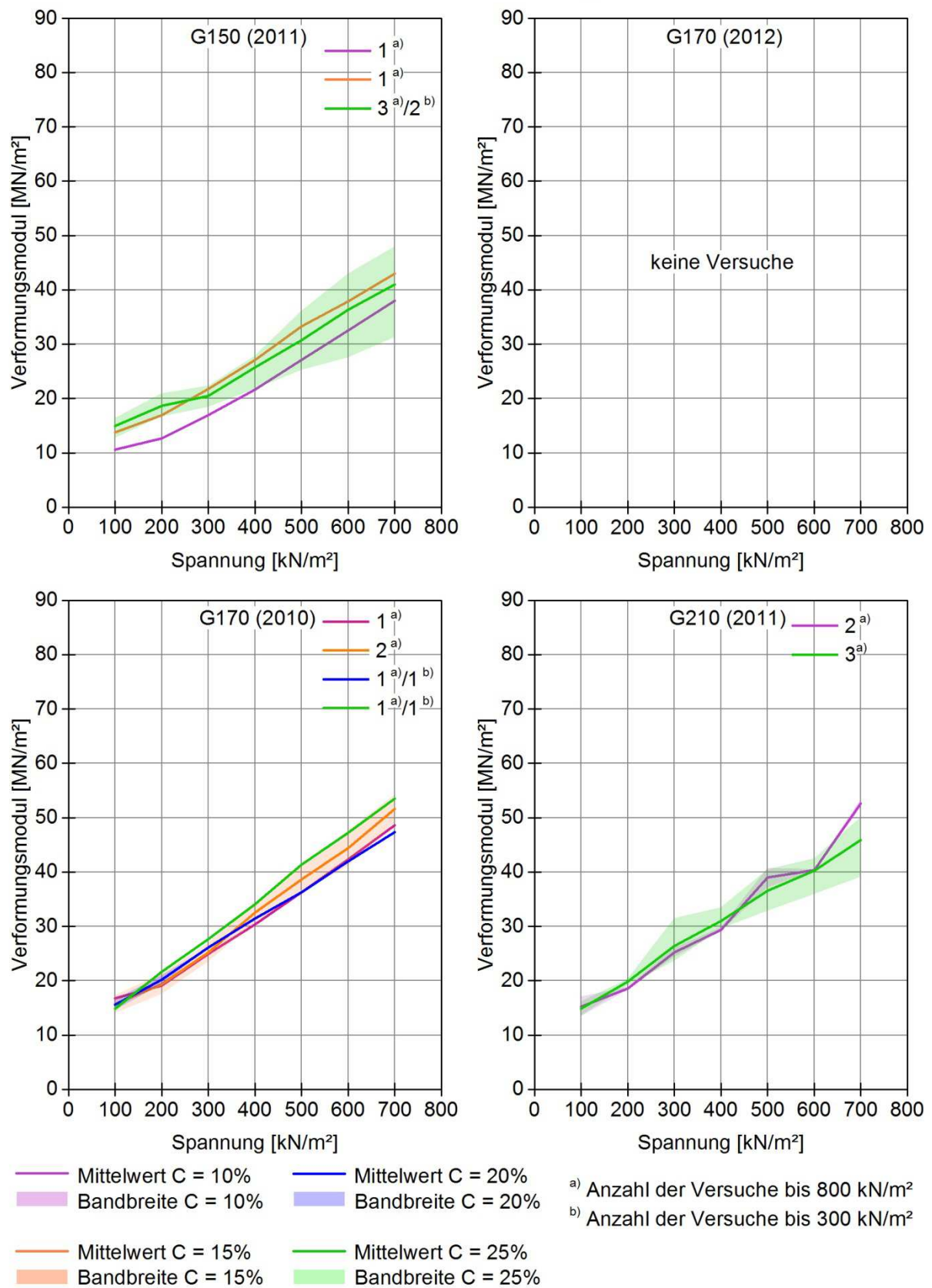


Abbildung 3-94: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 28 \text{ cm}$  und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$

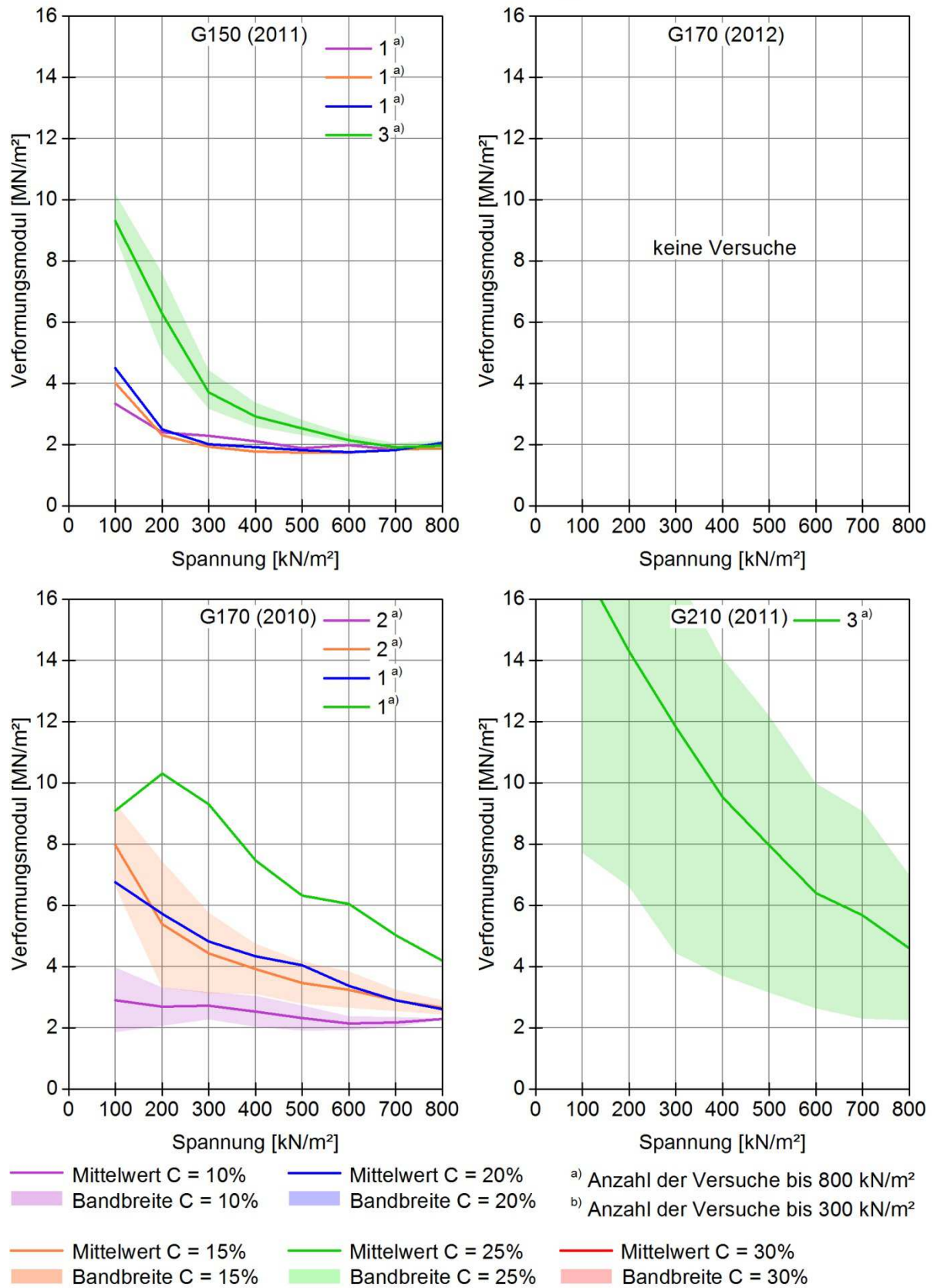


Abbildung 3-95: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 50$  cm (1-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 50$  cm

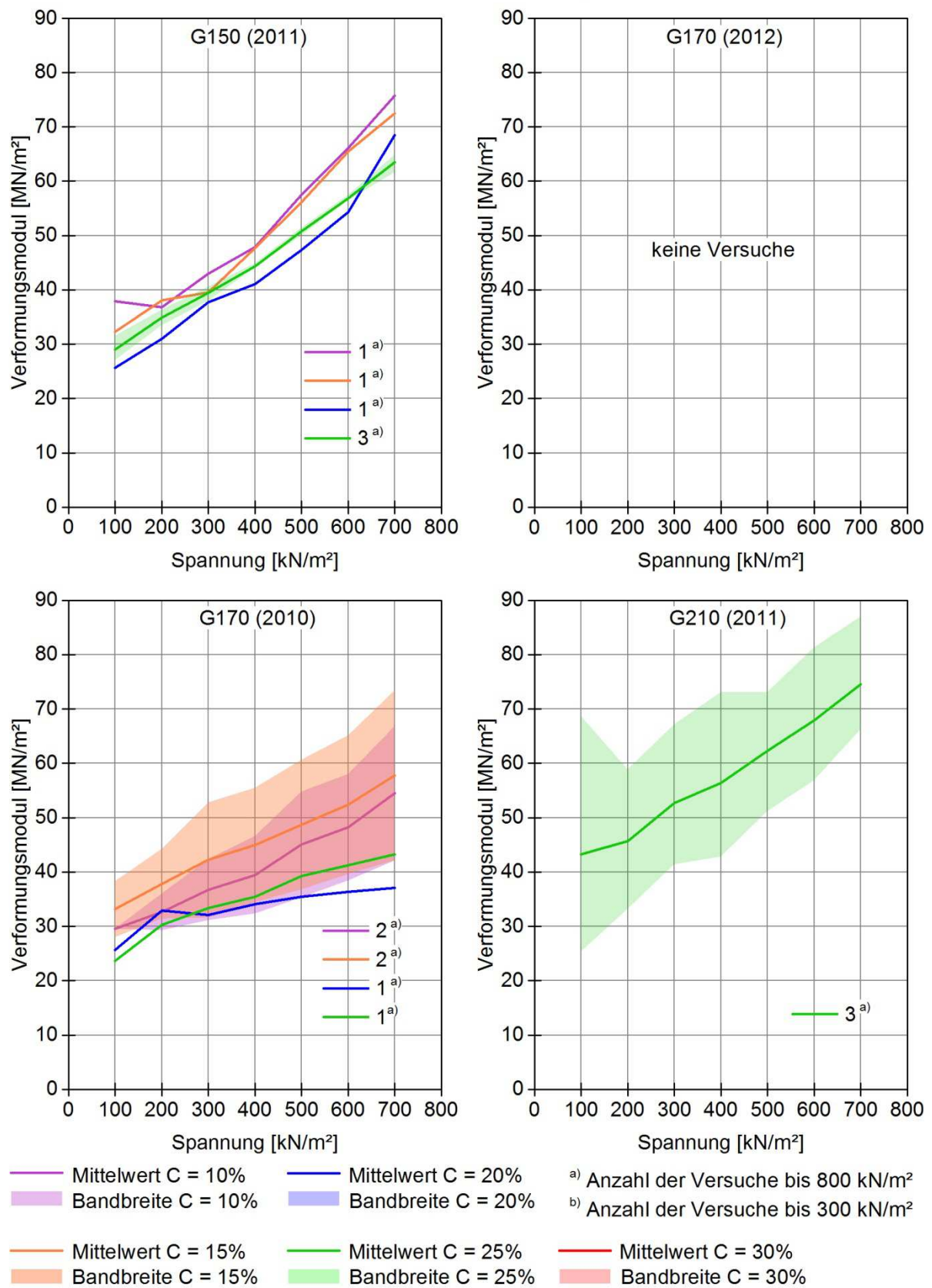


Abbildung 3-96: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von SH = 50 cm (1-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von FB = 50 cm

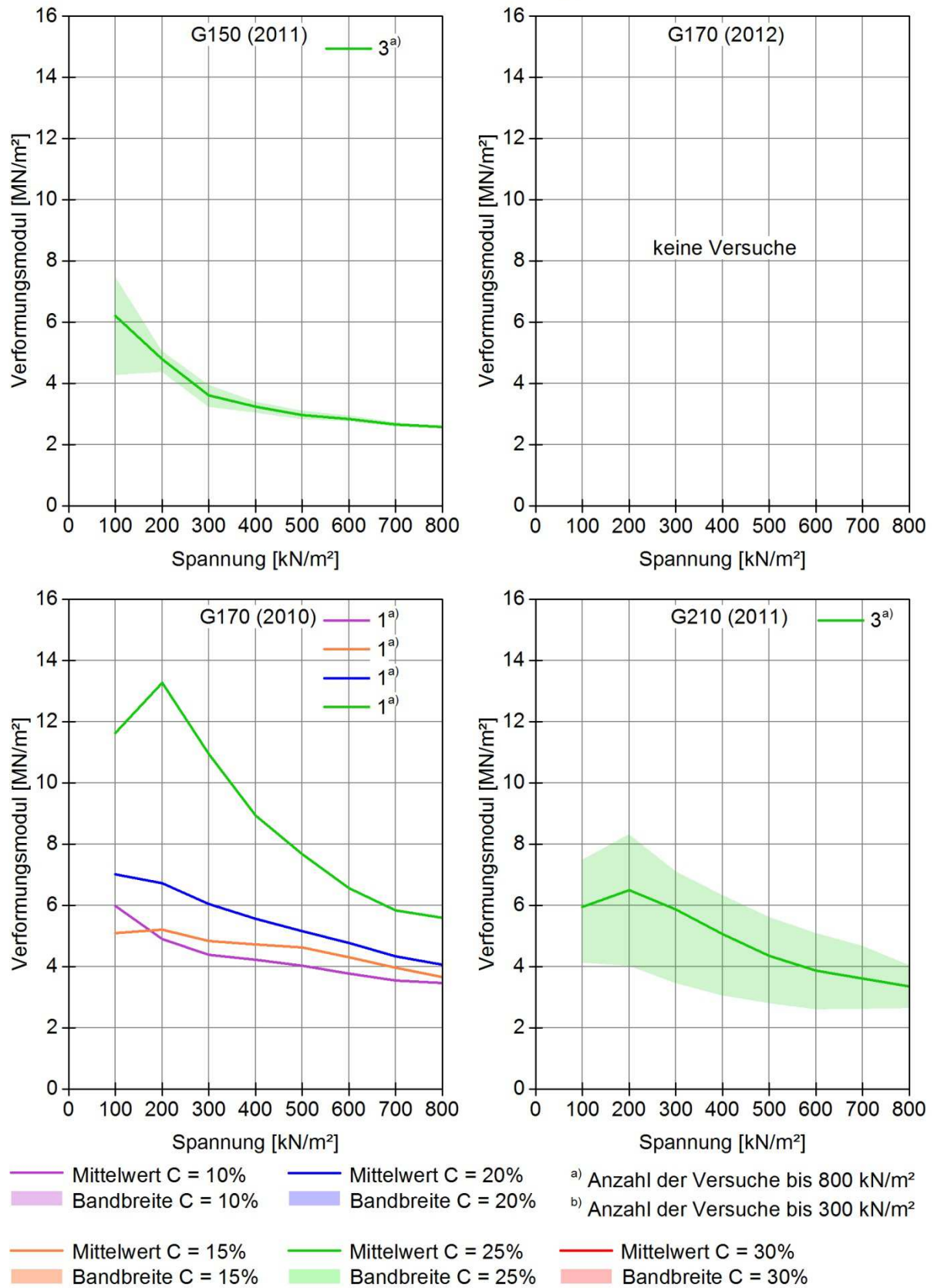


Abbildung 3-97: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 50 \text{ cm}$  (1-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$



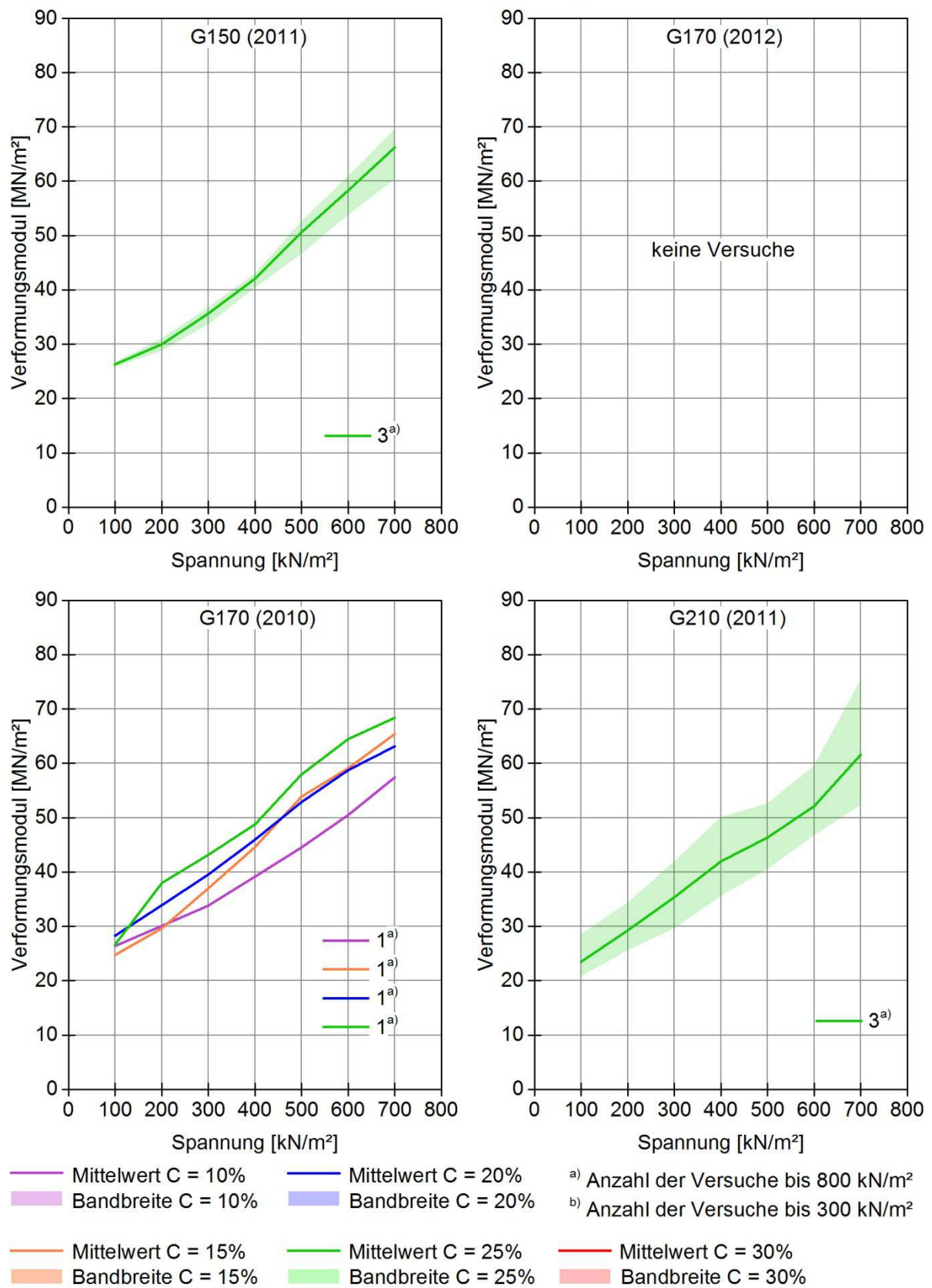


Abbildung 3-98: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 50 \text{ cm}$  (1-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$

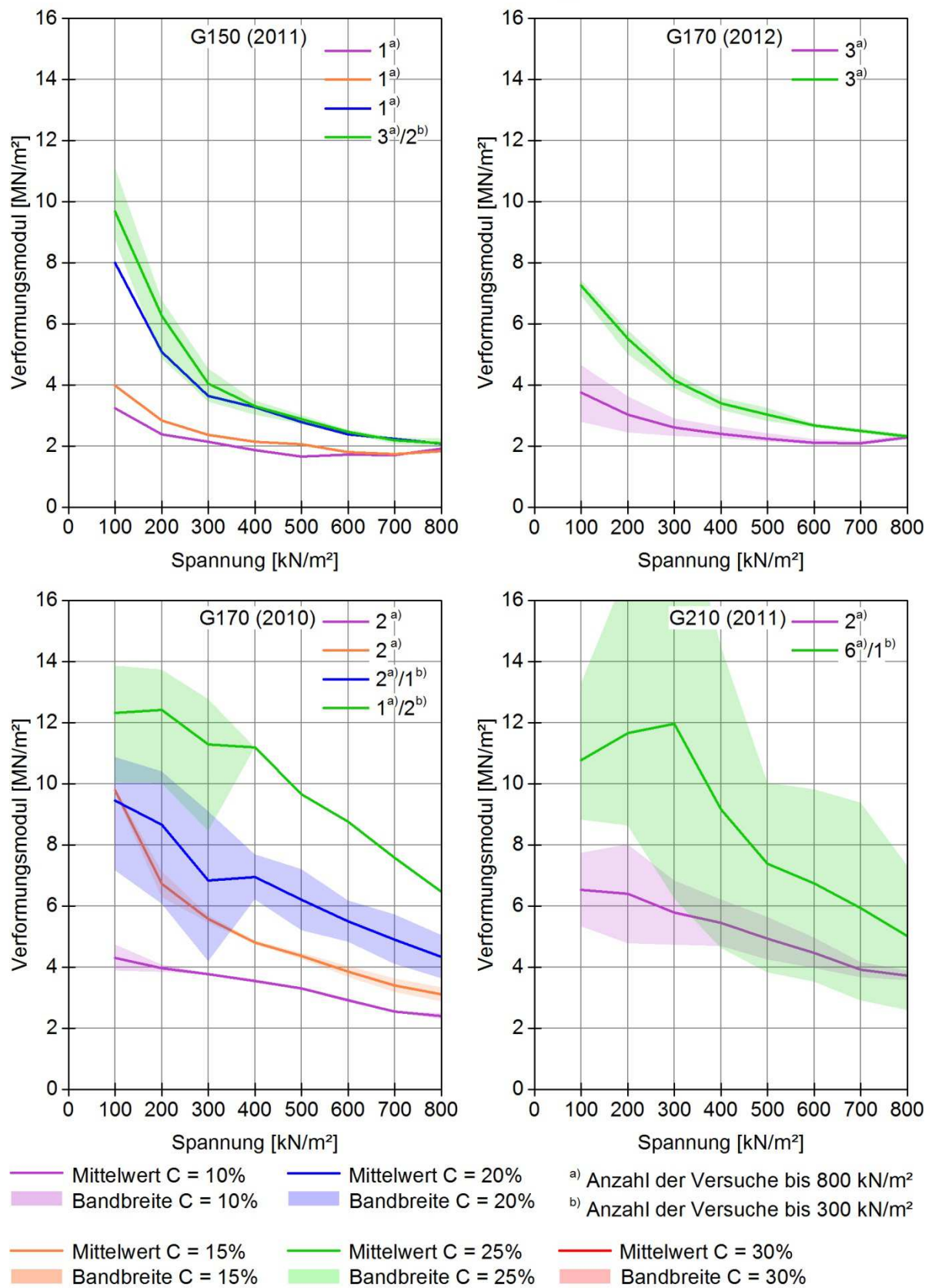


Abbildung 3-99: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 50 \text{ cm}$  (2-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 50 \text{ cm}$

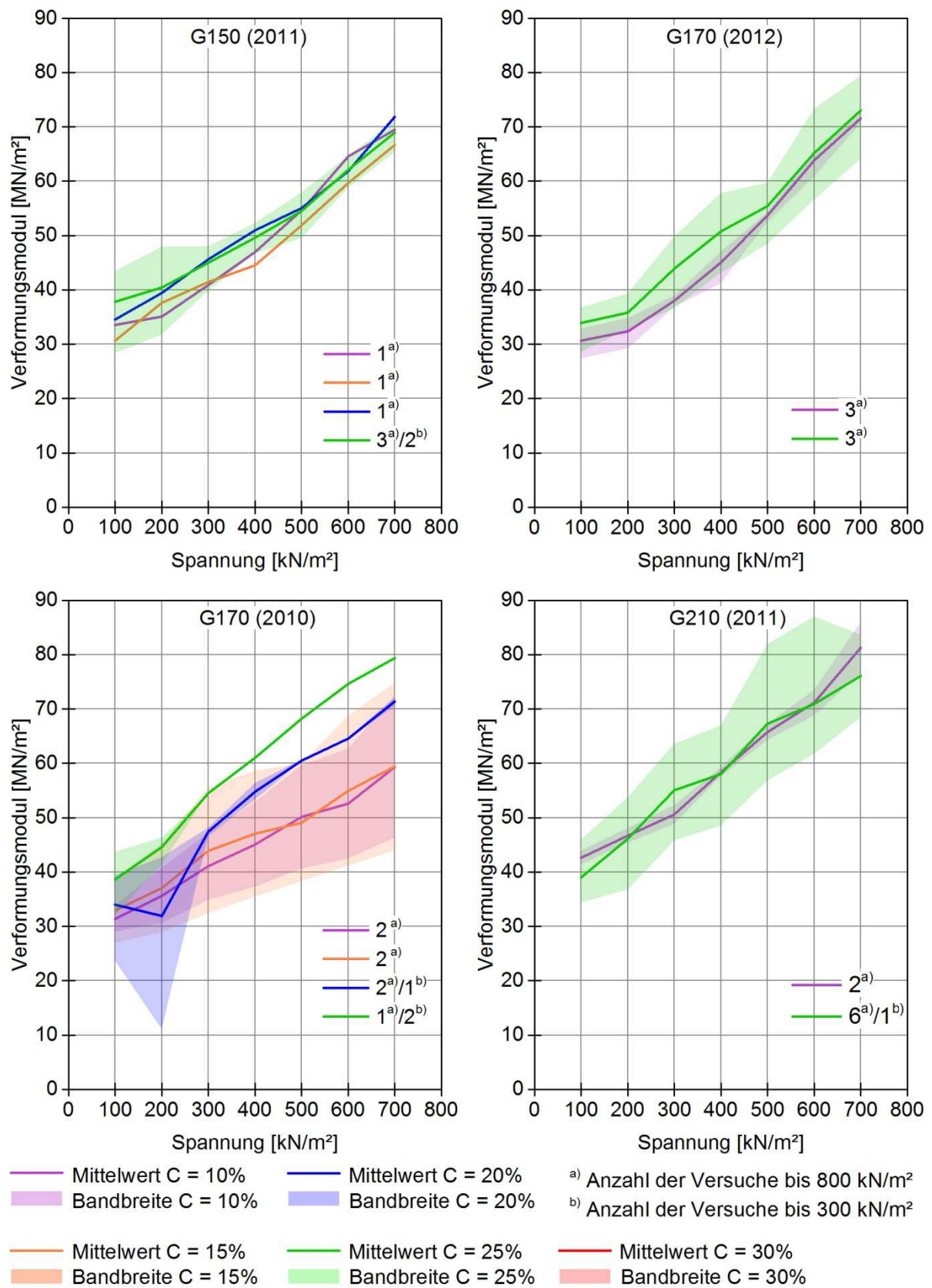


Abbildung 3-100: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von SH = 50 cm (2-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von FB = 50 cm



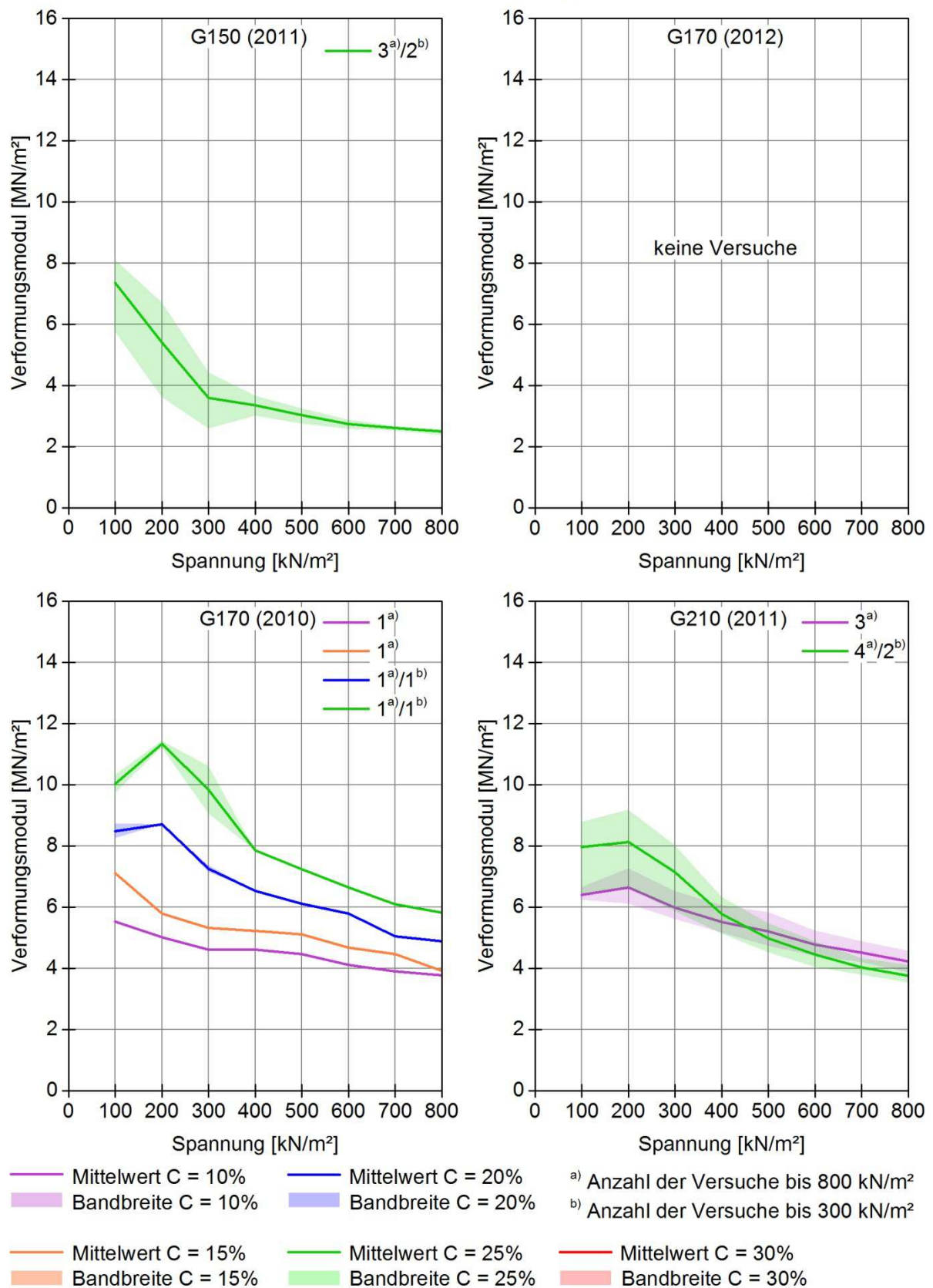


Abbildung 3-101: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 50$  cm (2-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 100$  cm

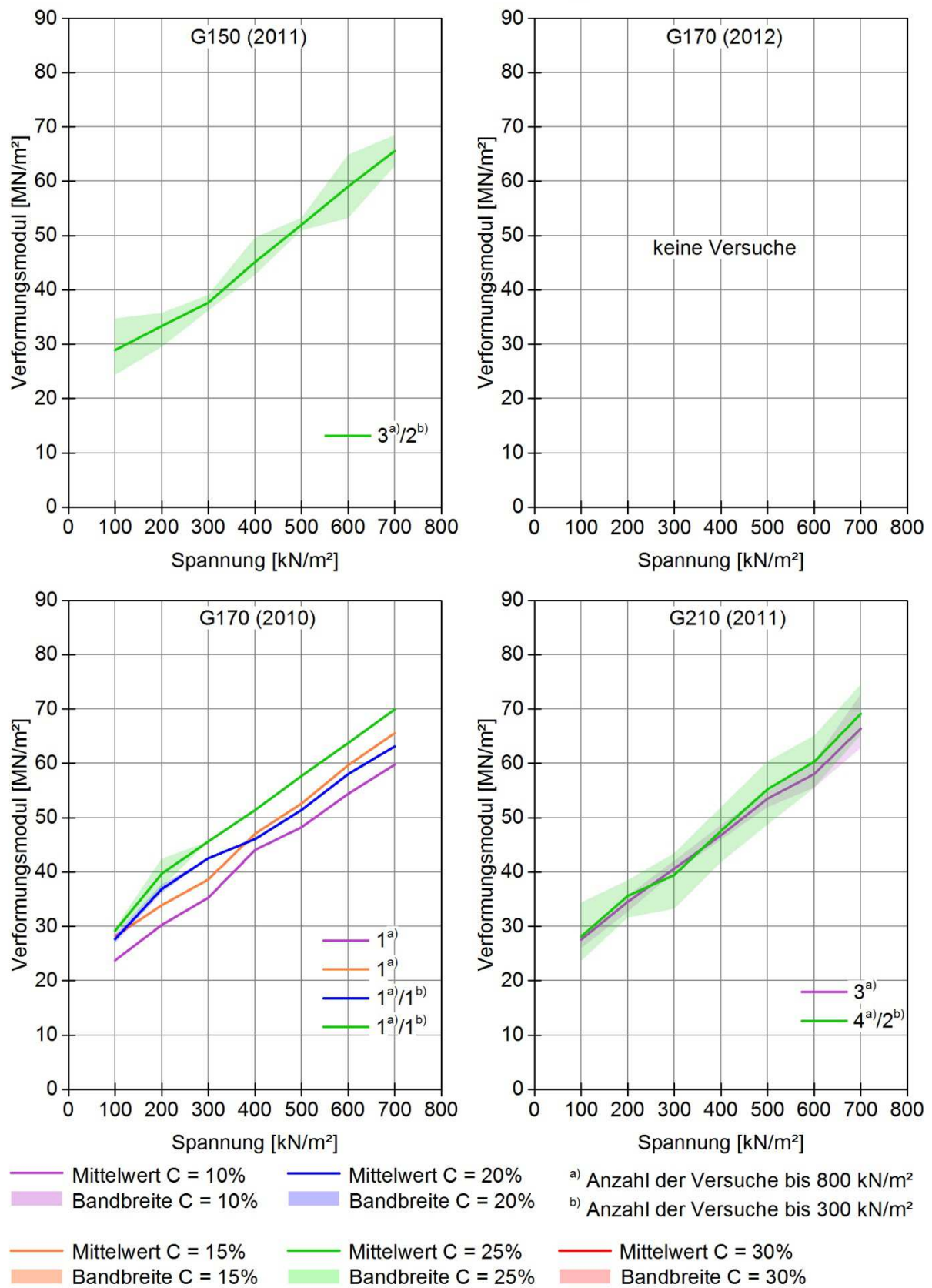


Abbildung 3-102: Vergleich der Verformungsmoduln  $E_{v2}$  für eine Schichthöhe von  $SH = 50 \text{ cm}$  (2-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den obigen Abbildungen zusammengefasst:

- Für den Verformungsmodul der Erstbelastung  $E_{V1}$  ist das Maß der Verdichtung von maßgebender Bedeutung. Unabhängig vom Material, von der Schichtstärke, der Fundamentbreite oder der Art des Einbaues (1- oder 2-lagig) resultiert aus einer stärkeren Verdichtung C ein höherer Wert des Verformungsmoduls und somit ein steiferes Verhalten der GSG-Schicht. In der Praxis sollte somit auf eine einwandfreie Verdichtung der GSG-Schicht besonders Wert gelegt werden.
- Der Verformungsmodul der Wiederbelastung  $E_{V2}$  ist um ca. eine Zehnerpotenz größer als jene der Erstbelastung.
- Die Größe des Verformungsmoduls der Erstbelastung  $E_{V1}$  ist auch von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Einzelkornes abhängig (siehe auch Tabelle 3-8). Mit ansteigender Druckfestigkeit vergrößert sich auch der Wert des Verformungsmoduls der Erstbelastung  $E_{V1}$ .
- Die Art des Einbaues von GSG in Lagenstärken von maximal 50 cm (1- oder 2-lagig) besitzt einen geringen Einfluss auf die sich einstellende Größe des Verformungsmoduls der Erstbelastung  $E_{V1}$ .
- Die ermittelten Verformungsmoduln weisen zum Teil eine sehr hohe Streuung auf, was auf die Streuung der Materialkennwerte (Druckfestigkeit, Bruchfestigkeit) zurückzuführen ist (Tabelle 3-8).

### 3.4.3 Versuche zur Tragfähigkeit von GSG-Schichten

Zweck der Versuche war es, mögliche Versagensmechanismen von GSG-Schichten zu untersuchen. Insgesamt wurden innerhalb des Forschungsvorhabens 3 Traglastversuche durchgeführt. Eine detaillierte Übersicht der Versuche, mit Informationen über die im Zuge der Durchführung variierten Parameter, können der Tabelle 3-29 entnommen werden.

*Tabelle 3-29: Übersicht großmaßstäbliche Versuche Universität Innsbruck - Traglastuntersuchung*

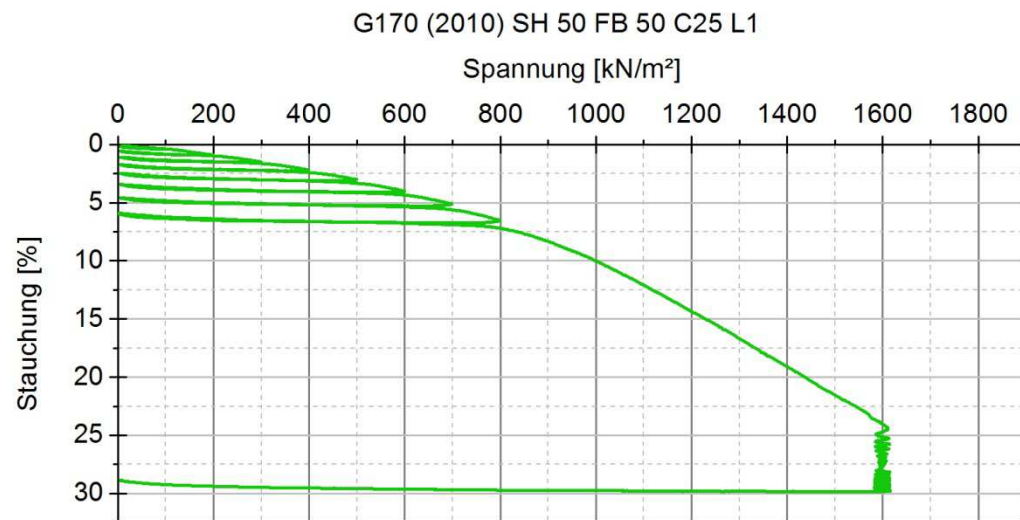
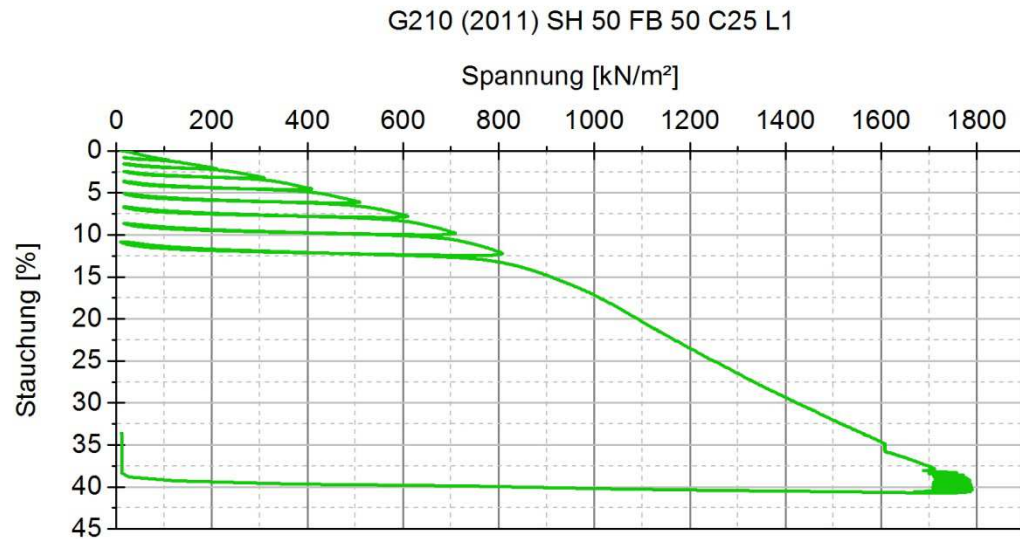
| Nummer | Datum      | Material    | Länge Laststempel | Schichthöhe | Einbauart | Verdichtung |
|--------|------------|-------------|-------------------|-------------|-----------|-------------|
| 1      | 21.01.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,50 m      | 1-lagig   | 10%         |
| 2      | 10.03.2011 | G170 (2010) | 0,50 m            | 0,50 m      | 1-lagig   | 25%         |
| 3      | 11.07.2011 | G210 (2011) | 0,50 m            | 0,50 m      | 1-lagig   | 25%         |

#### 3.4.3.1 Versuchsdurchführung

Die Aufbringung der Belastung im Zuge eines Traglastversuches erfolgt wie beim Kurzzeitversuch (siehe Abschnitt 3.4.2.1), lediglich mit dem Unterschied, dass nach erfolgter Entlastung der Laststempelspannung von 800 kN/m<sup>2</sup> die Belastung erneut bis zum Versagen der GSG-Schicht gesteigert werden soll (s. *Abbildung 3-103*).

### **3.4.3.2 Auswertung und Ergebnisse**

Ein grundbruchartiges Versagen wurde erst bei sehr hohen Belastungen mit Laststempelspannungen im Bereich von  $1600 \div 1800 \text{ kN/m}^2$  beobachtet (s. *Abbildung 3-103*). In allen drei Fällen stellt sich ein Versagensmechanismus ein, der durch einen „Fließzustand“ gekennzeichnet ist, wobei die Verformungen zunehmen, die Belastungen aber nicht weiter gesteigert werden können. Der Versagensmechanismus beruht somit auf einem duktilen Verhalten.



|    |                   |   |                                                             |
|----|-------------------|---|-------------------------------------------------------------|
| SH | Schichthöhe       | C | Verdichtung                                                 |
| FB | Laststempelbreite | L | Anzahl der Schichten (Lagen) bei der Herstellung der Proben |

Abbildung 3-103: Arbeitslinien der Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit von GSG-Schichten





Abbildung 3-104: Aufwölbung der Oberfläche der Probe seitlich des Laststempels während des Versuchs



Abbildung 3-105: Darstellung der Kornverschiebungen durch Kornabrieb von der Probe an der Seitenwand des Versuchsbehälters



### **3.4.4 Langzeitversuche**

#### **3.4.4.1 Versuchsdurchführung**

Die Aufbringung der Belastung im Zuge eines Langzeitversuches gestaltet sich derart, dass die Belastung in Schritten von 100 kN/m<sup>2</sup> bis zu einem Wert von 300 kN/m<sup>2</sup> gesteigert wird, wobei auch hier nach jedem aufgebrauchten Belastungsschritt eine fast vollständige Entlastung der GSG-Schicht erfolgt (siehe auch Standardkurzzeitversuch). Insgesamt besteht der Versuch somit aus 3 Lastzyklen, mit Belastungsmaxima von jeweils 100, 200 und 300 kN/m<sup>2</sup>, wobei nach Erreichen der Belastung von 300 kN/m<sup>2</sup> dieser Wert für einen Zeitraum von ca. 3 Tagen konstant gehalten wird.

#### **3.4.4.2 Auswertung und Ergebnisse**

Abbildung 3-106 bis Abbildung 3-109 zeigt einen Vergleich der zeitabhängigen Stauchungen in Abhängigkeit von der Schichthöhe SH und der Breite des Laststempels FB für die Materialtypen G150 (2011), G170 (2010) und G210 (2011) sowie für verschiedene Verdichtungen C und einer konstanten Laststempelbelastung von 300 kN/m<sup>2</sup>.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den nachfolgenden Abbildungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Stauchungszunahme über die Zeit ist im hohen Maße von der Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Einzelkornes abhängig. Korngemische mit hohen Druckfestigkeiten der Einzelkörner weisen eine geringere zeitabhängige Zunahme der Stauchung auf.
- Das Maß der Verdichtung hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die zeitabhängige Zunahme der Stauchung.

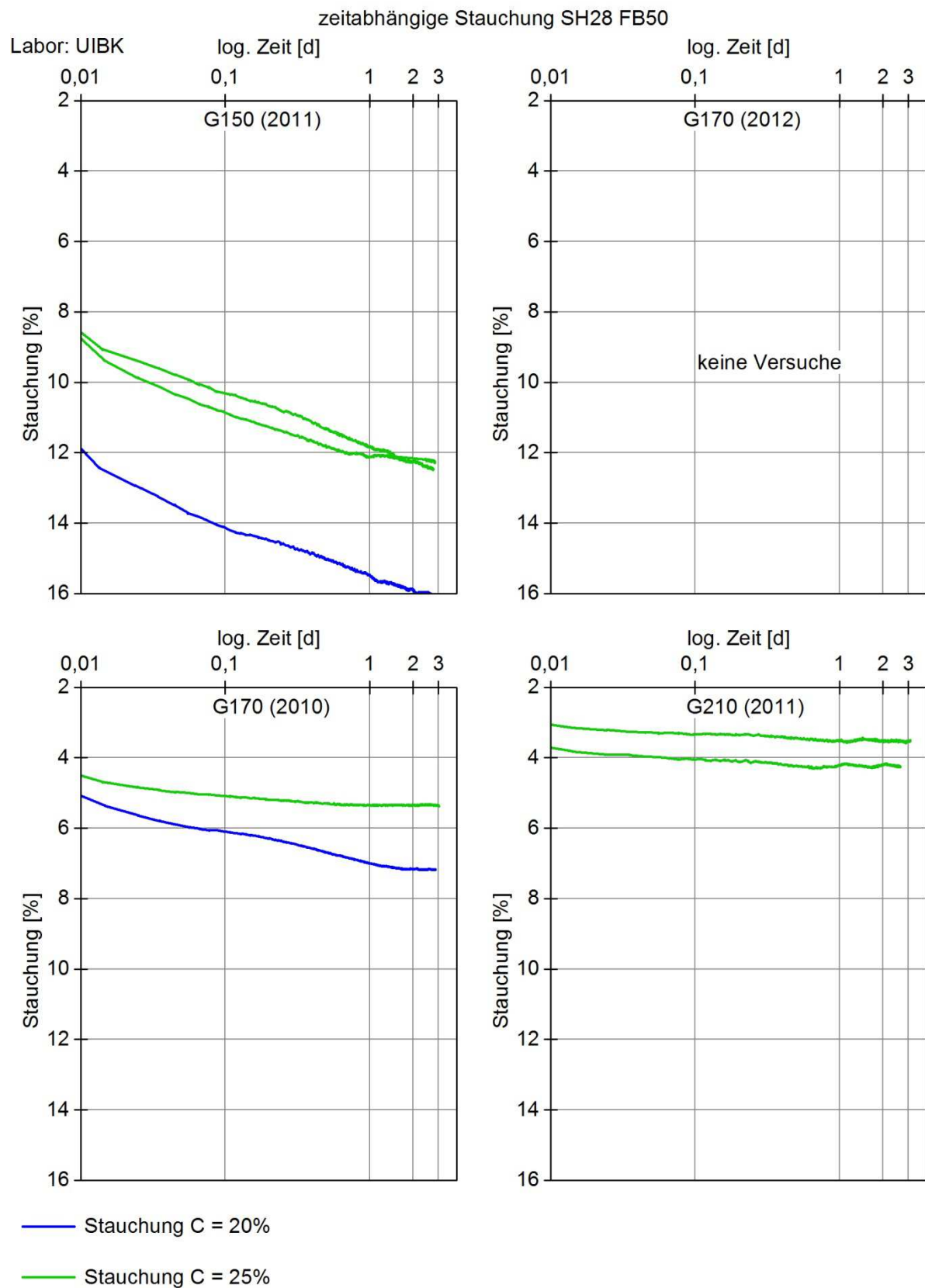


Abbildung 3-106: Vergleich der zeitabhängigen Stauchungen für eine Schichthöhe von  $SH = 28 \text{ cm}$  (1-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 50 \text{ cm}$

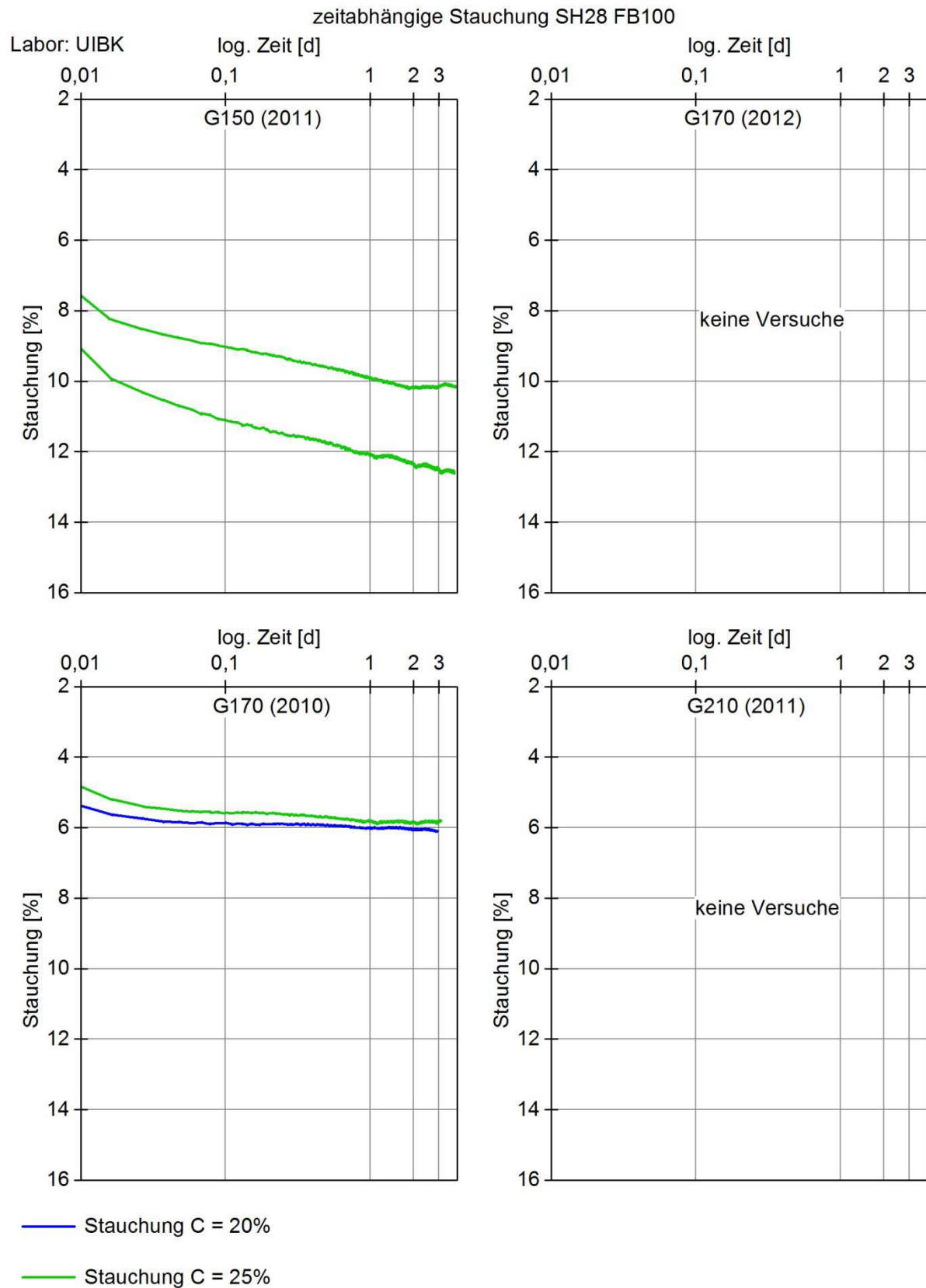


Abbildung 3-107: Vergleich der zeitabhängigen Stauchungen für eine Schichthöhe von  $SH = 28 \text{ cm}$  (1-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$

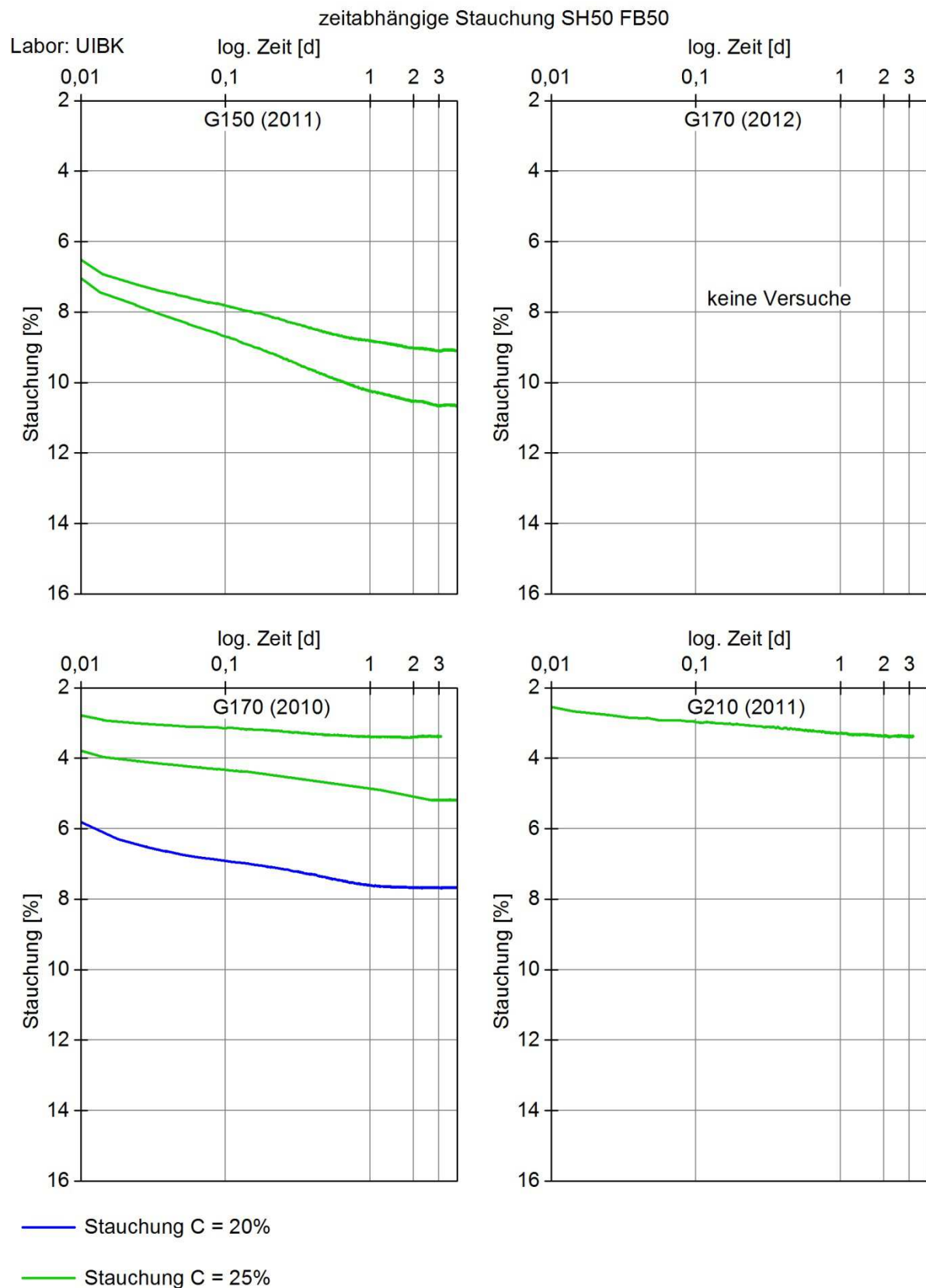


Abbildung 3-108: Vergleich der zeitabhängigen Stauchungen für eine Schichthöhe von  $SH = 50 \text{ cm}$  (2-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 50 \text{ cm}$

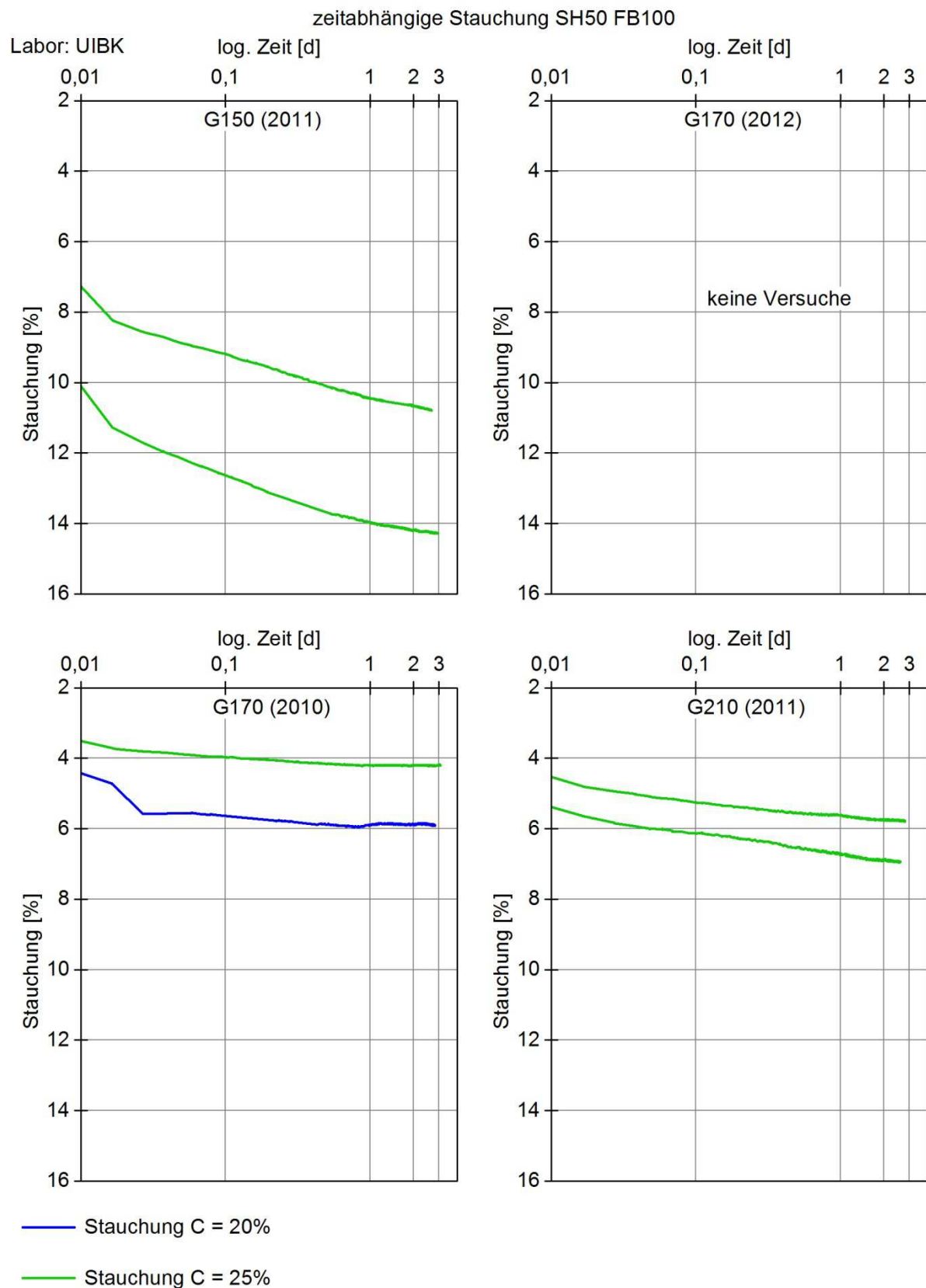


Abbildung 3-109: Vergleich der zeitabhängigen Stauchungen für eine Schichthöhe von  $SH = 50 \text{ cm}$  (2-lagiger Einbau) und eine Laststempelbreite von  $FB = 100 \text{ cm}$

### 3.5 Dynamischer Lastplattenversuch – Untersuchungen unter Laborbedingungen

#### 3.5.1 Versuche ohne Auflast

Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (LFG) dient zur Beurteilung der Qualität der Verdichtung von Schüttmaterialien.

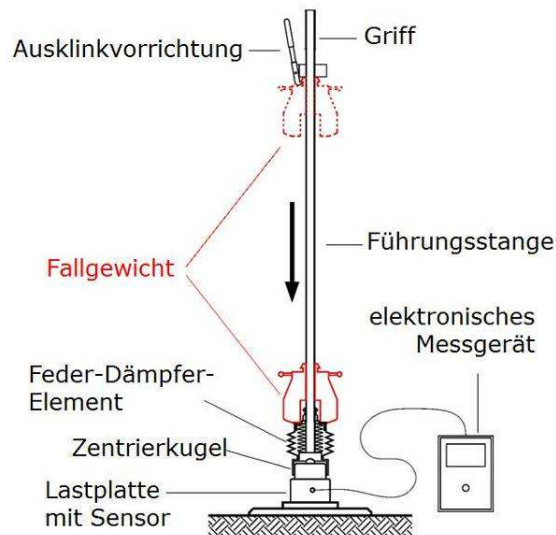


Abbildung 3-110: Komponenten des Leichten Fallgewichtsgerätes [Brandl 2003]

Mit Hilfe einer definierten Fallmasse wird eine stoßförmige Belastung über eine Lastplatte auf ein zu prüfendes Planum eingeleitet. Durch den Stoß erfährt die Lastplatte eine Beschleunigung. Diese Beschleunigung wird durch einen in der Lastplatte eingebauten Sensor gemessen. Auf Basis der gemessenen Beschleunigung kann durch zweifache Integration auf die Lastplattenverschiebung und somit die auf Verformung  $z_{\max,i}$  des zu prüfenden Planums während der stoßförmigen Belastung geschlossen werden. Dieser Wert dient unter Berücksichtigung diverser Vereinfachungen, wie z.B. der Annahme einer konstanten mittleren Spannung  $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$  unter der Lastplatte, zur Berechnung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{\text{vd},i}$  zufolge eines Einzelstoßes.

$$E_{\text{vd},i} [\text{MN / m}^2] = \frac{22,5}{z_{\max,i} [\text{mm}]} \quad (3-28)$$

mit:

$E_{\text{vd},i}$  Dynamischer Verformungsmodul zufolge eines Einzelstoßes

$z_{\max,i}$  maximale Lastplattenverschiebung zufolge eines Einzelstoßes

Für die Beurteilung des prüfenden Planums werden insgesamt 6 Stöße durchgeführt, wobei die Stöße 1 bis 3 zur Sicherstellung des Formschlusses zwischen dem Planum und der Lastplatte dienen und die Stöße 4 bis 6 für die Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{\text{vd}}$  herangezogen werden. Hierfür wird der Mittelwert der maximalen Lastplattenverschiebungen  $z_{\max}$  der Stöße 4 bis 6 berechnet und daraus der dynamische Verformungsmodul  $E_{\text{vd}}$  gemäß Gleichung (3-29) bestimmt.



$$E_{vd} [\text{MN} / \text{m}^2] = \frac{22,5}{z_{\max} [\text{mm}]} \quad (3-29)$$

mit:

$E_{vd}$  Dynamischer Verformungsmodul zufolge der Stöße 4 ÷ 6

$z_{\max}$  Mittelwert der maximalen Lastplattenverschiebungen zufolge der Stöße 4 ÷ 6

Der Wert  $E_{vd}$  dient schlussendlich als Basis zur Beurteilung der getroffenen Verdichtungsmaßnahme.

### 3.5.1.1 Versuchsdurchführung

Im Erdbaulaboratorium des Instituts für Geotechnik an der Technischen Universität Wien wurden Untersuchungen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät an verdichteten GSG-Schichten durchgeführt, wobei der Materialtyp (G150 (2013) bzw. G210 (2013)), die Schichthöhe (28 cm bzw. 50 cm), die Art des Einbaues (1- bzw. 2-lagig) sowie das Maß der Verdichtung (10% bzw. 25%) variiert wurden.

Eine detaillierte Übersicht der Versuche, mit Informationen über die im Zuge der Herstellung der GSG-Schicht (Probe) variierten Parameter, können der Tabelle 3-30 entnommen werden.

*Tabelle 3-30: Untersuchte Proben*

| Probe                | Materialtyp | Schichthöhe SH | Verdichtung C | Anzahl der Lagen |
|----------------------|-------------|----------------|---------------|------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 | G150 (2013) | 28 cm          | 10 %          | 1                |
| G150 (2013) SH28 C25 | G150 (2013) | 28 cm          | 25 %          | 1                |
| G150 (2013) SH50 C10 | G150 (2013) | 50 cm          | 10 %          | 2                |
| G150 (2013) SH50 C25 | G150 (2013) | 50 cm          | 25 %          | 2                |
| G210 (2013) SH28 C10 | G210 (2013) | 28 cm          | 10 %          | 1                |
| G210 (2013) SH28 C25 | G210 (2013) | 28 cm          | 25 %          | 1                |
| G210 (2013) SH50 C10 | G210 (2013) | 50 cm          | 10 %          | 2                |
| G210 (2013) SH50 C25 | G210 (2013) | 50 cm          | 25 %          | 2                |

Das GSG wurde in einen Versuchsbehälter geschüttet und verdichtet. Der Versuchsbehälter besteht aus Holzplatten mit einer Grundfläche von 1,0 m x 1,0 m und eine Höhe von 0,70 m und ist seitlich mittels Hohlprofilen aus Stahl verstärkt. Der Boden des Versuchsbehälters besteht aus einer ca. 10 cm dicken Betonschicht, welche formschlüssig auf dem Estrich des Kellergeschoßes des Erdbaulaboratoriums lagert. Am Boden und an einer Seitenwand wurde jeweils eine Erddruckdose zur Messung der vertikalen und horizontalen Spannungen angeordnet, wobei die Erddruckdose EV am Boden und die Erddruckdose EH an der Seitenwand des Versuchsbehälters situiert wurden.

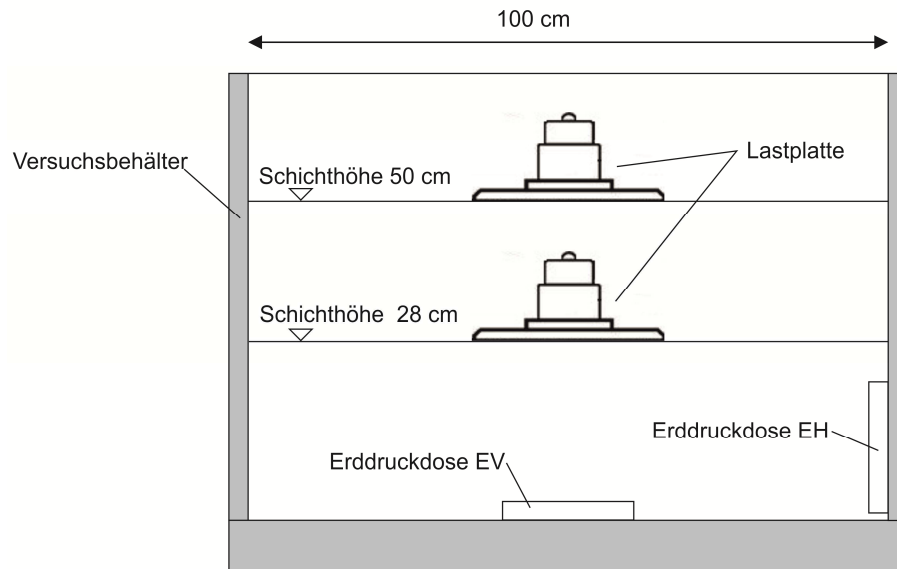


Abbildung 3-111: Versuchsbehälter und Anordnung der Erddruckdosen EV und EH

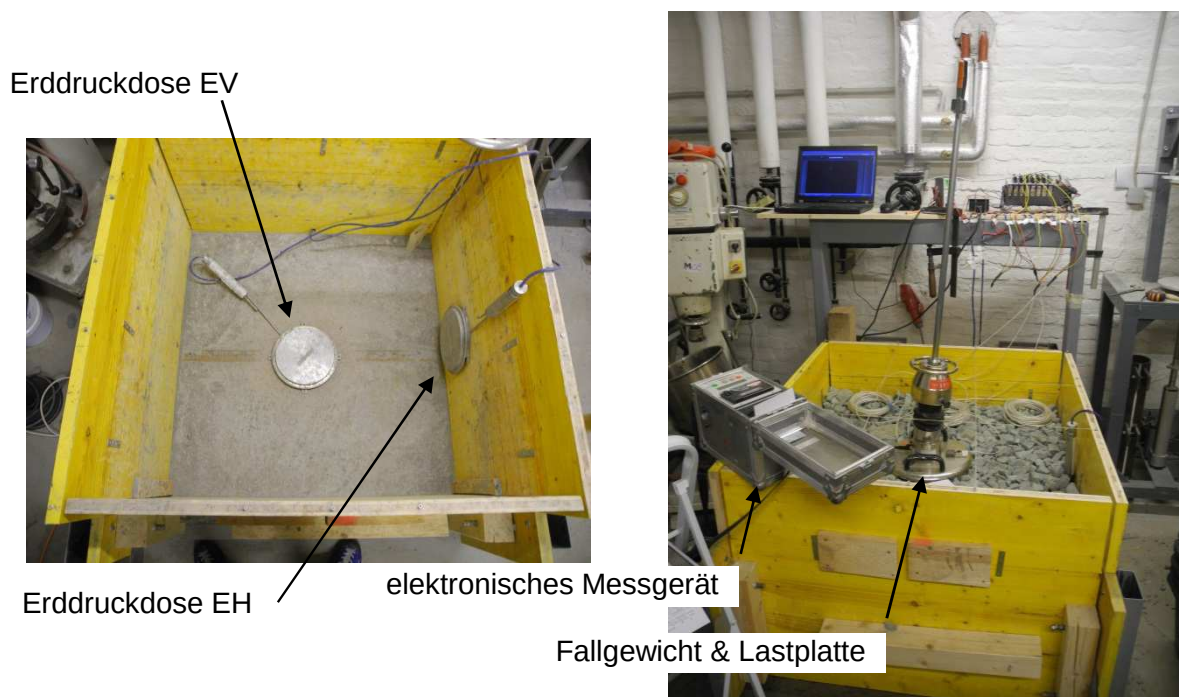


Abbildung 3-112: Versuchsbehälter, Anordnung der Erddruckdosen EH und EV, Lastplatte, Fallgewicht und elektronisches Messgerät

Entgegen der standardisierten Versuchsdurchführung wurden je Probe mehr als 6 Stöße ausgeführt. Damit sollten etwaige Veränderungen der Probe durch die stoßförmige Belastung über den 6. Stoß hinaus dokumentiert werden.

### 3.5.1.2 Auswertung und Ergebnisse

In Abbildung 3-113 sind die Verläufe der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,i}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Stöße dargestellt. Mit steigender Anzahl der Stöße kommt es zu einem Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,i}$ , wobei der Zuwachs innerhalb der ersten 3 Stöße am stärksten ausgeprägt ist. Dies wird auf den fehlenden Formschluss vor dem 1. Stoß zwischen der Oberfläche der GSG-Schicht und der Lastplatte zurückgeführt.

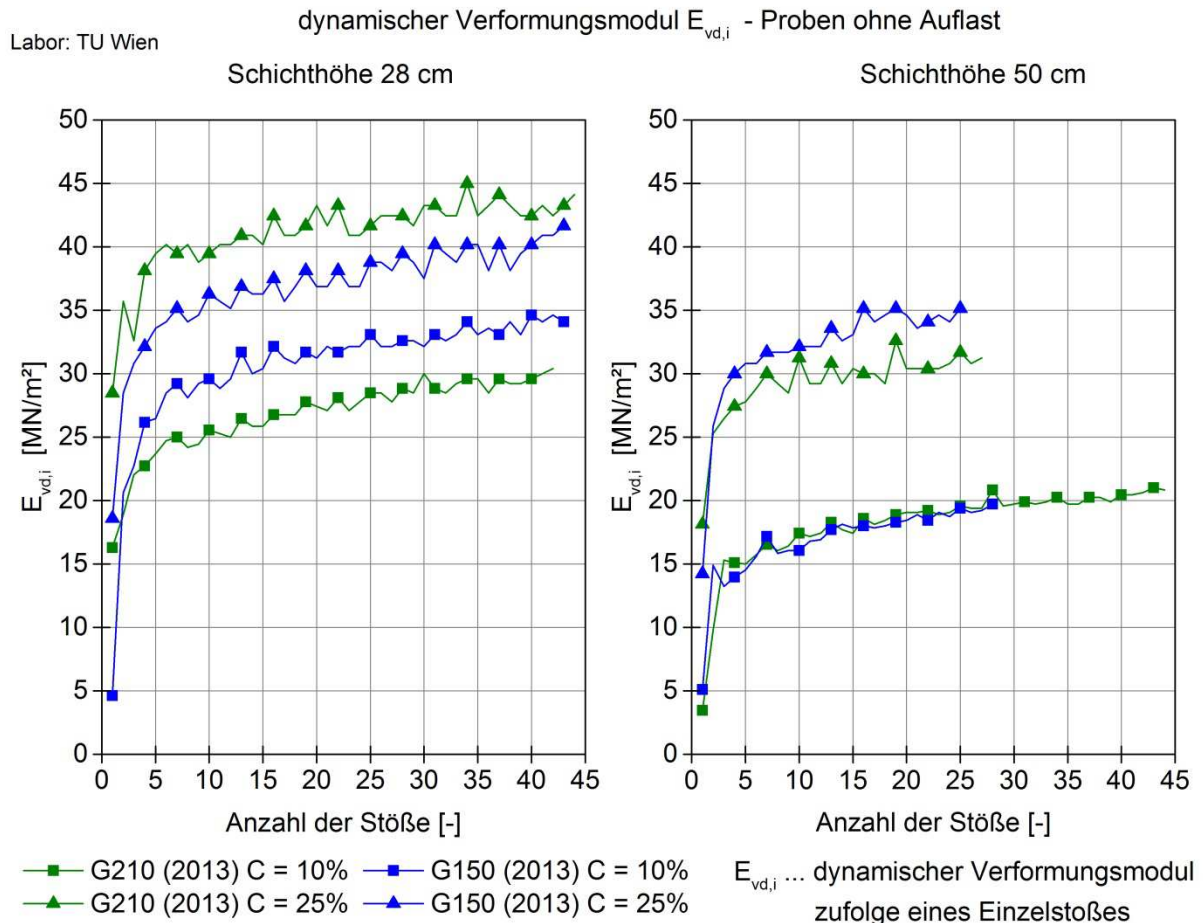


Abbildung 3-113: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd,i}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Stöße

In Tabelle 3-31 sind die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  als Mittelwert der Stöße 4 ÷ 6 und die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,Ende}$  als Mittelwert der letzten 3 Stöße je Probe angeführt. Der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls in % ist bei den Proben mit einer geringeren Verdichtung C tendenziell stärker ausgeprägt.

*Tabelle 3-31: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd}$  und der Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls je Probe*

| Probe                | $E_{vd}$ <sup>1)</sup><br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{vd, Ende}$ <sup>2)</sup><br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Zuwachs <sup>3)</sup><br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Zuwachs <sup>4)</sup><br>[%] |
|----------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 | 27,0                                           | 34,3                                                 | 7,3                                           | 27%                          |
| G150 (2013) SH28 C25 | 33,3                                           | 41,2                                                 | 7,9                                           | 24%                          |
| G150 (2013) SH50 C10 | 14,7                                           | 19,3                                                 | 4,6                                           | 31%                          |
| G150 (2013) SH50 C25 | 30,6                                           | 34,6                                                 | 4,0                                           | 13%                          |
| G210 (2013) SH28 C10 | 23,7                                           | 30,0                                                 | 6,3                                           | 27%                          |
| G210 (2013) SH28 C25 | 39,3                                           | 43,3                                                 | 4,0                                           | 10%                          |
| G210 (2013) SH50 C10 | 15,3                                           | 20,8                                                 | 5,5                                           | 36%                          |
| G210 (2013) SH50 C25 | 28,2                                           | 31,3                                                 | 3,1                                           | 11%                          |

<sup>1)</sup> Mittelwert aus den Stößen 4 ÷ 6

<sup>3)</sup> Zuwachs = Differenz aus  $E_{vd, Ende}$  und  $E_{vd}$

<sup>2)</sup> Mittelwert aus den letzten 3 Stößen

<sup>4)</sup> Quotient aus Zuwachs [MN/m<sup>2</sup>] und  $E_{vd}$

Vergleicht man die Ergebnisse der Versuche mit gleichen Materialtypen, so zeigen sich folgende Zusammenhänge:

- Für den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  ist das Maß der Verdichtung C von maßgebender Bedeutung.
- Die Variation der Materialtypen hat nur einen geringen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  und liegt innerhalb der Streubreite der Versuchsergebnisse.
- Der dynamische Verformungsmodul wird von der Schichthöhe SH beeinflusst. So resultieren aus dem Last- Verformungsverhalten der Proben mit einer Schichthöhe von SH = 28 cm höhere dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd}$  als bei einer Schichthöhe von 50 cm.

Abbildung 3-114 zeigt die gemessenen Spannungen der Erddruckdosen EH und EV. Auf der linken Seite der Abbildung 3-114 sind die vertikalen Spannungen über die Zeit zufolge des 5. Stoßes dargestellt. Mit einem größeren Maß der Verdichtung C kommt es zu einer Reduktion der maximalen vertikalen Spannungen am Boden des Versuchsbehälters, was auf eine Verbesserung der Lastverteilung innerhalb der Proben bei einer höheren Verdichtung zurückgeführt wird.

Auf der rechten Seite der Abbildung 3-114 sind die Verläufe der horizontalen Spannungen über die Zeit zufolge des 5. Stoßes dargestellt. Es kommt nur zu einem geringen Anstieg der horizontalen Spannungen zufolge der stoßförmigen Belastung. Somit können Einflüsse durch

die seitlichen Begrenzungen der Proben (Seitenwände) auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  weitestgehend ausgeschlossen werden.

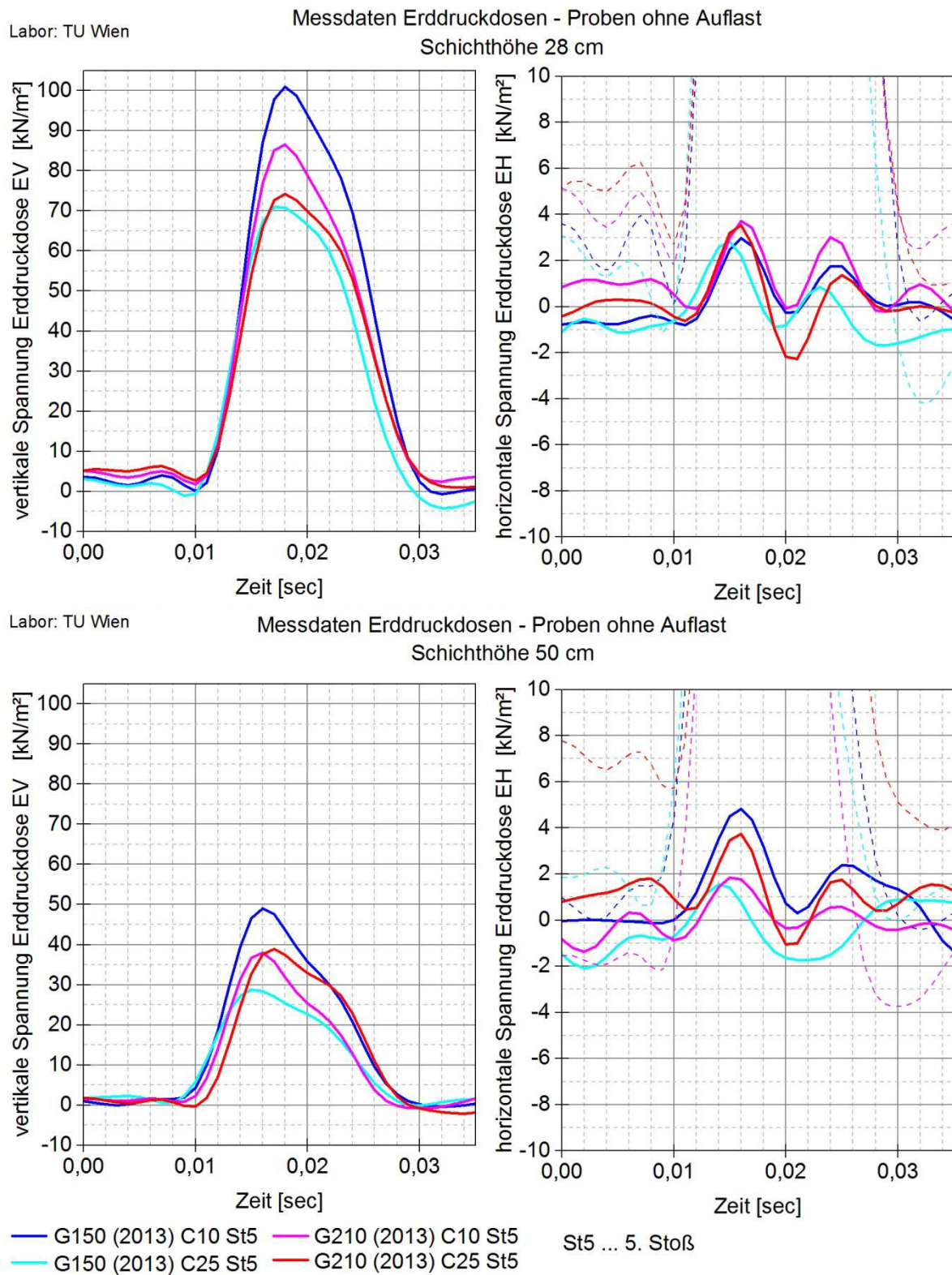


Abbildung 3-114: Messdaten der Erddruckdosen EH und EV je Materialtyp in Abhängigkeit von der Schichthöhe SH und der Verdichtung C für den 5. Stoß



Abbildung 3-115 zeigt den Zusammenhang zwischen der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  und dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  (Mittelwert der Stöße 4 ÷ 6). Dieser Zusammenhang weist nur eine sehr geringe Korrelation auf.

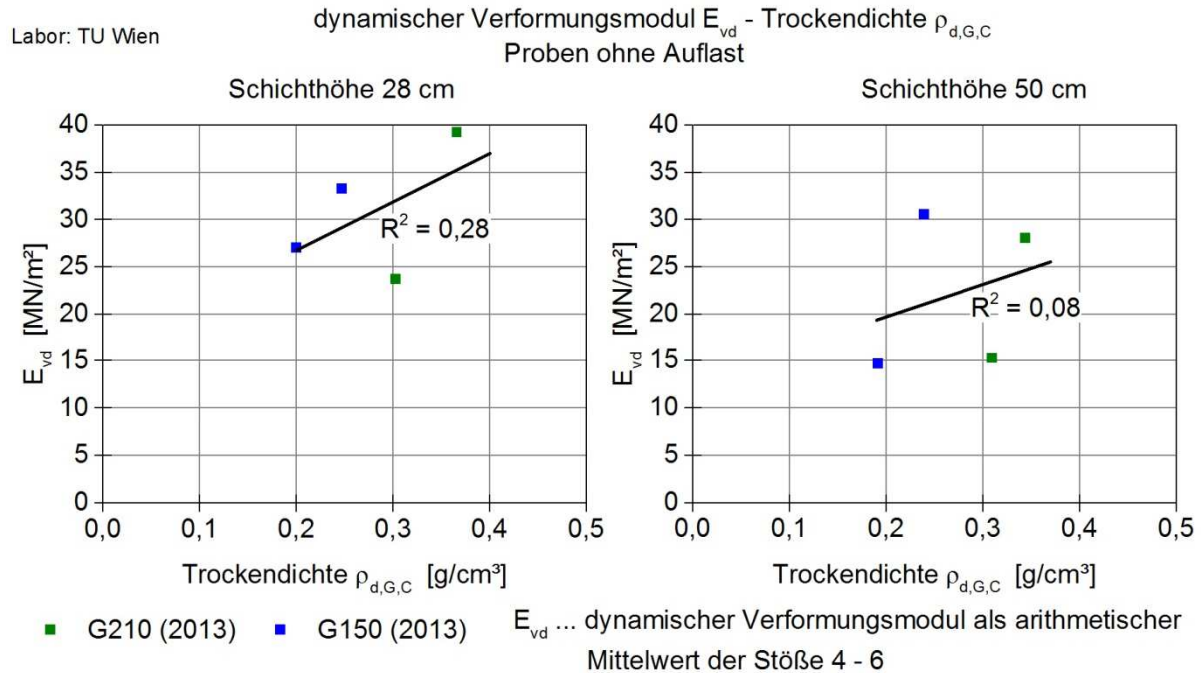


Abbildung 3-115: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$

### 3.5.2 Versuche mit Auflastring rund um die Lastplatte

#### 3.5.2.1 Versuchsdurchführung

Die im Folgenden beschriebenen Versuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät sind prinzipiell mit jenen des Abschnitts 3.5.1 vergleichbar, unterscheiden sich aber durch einen um die Lastplatte angeordneten Auflastring mit einer Masse von 90 kg. Der Ring weist einen Außendurchmesser von 60 cm und einen Innendurchmesser von 32 cm auf. Die Spannung unter dem Auflastring beträgt aufgrund der Eigenlast 4,4 kN/m<sup>2</sup>. Die dynamischen Verformungsmoduln, die auf Basis dieser Versuchsanordnung ermittelt werden, werden mit  $E_{vd,i,MA}$  bzw.  $E_{vd,MA}$  abgekürzt. Die Berechnung der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,i,MA}$  bzw.  $E_{vd,MA}$  erfolgt wie bereits in Abschnitt 3.5.1 beschrieben.





Abbildung 3-116: Auflastring rund um die Lastplatte

Eine detaillierte Übersicht der Versuche, mit Informationen über die im Zuge der Herstellung der GSG-Schicht (Probe) variierten Parameter, können der Tabelle 3-32 entnommen werden.

Tabelle 3-32: Untersuchte Proben mit Auflast (mA)

| Probe                   | Materialtyp | Schichthöhe SH | Verdichtung C | Anzahl der Lagen |
|-------------------------|-------------|----------------|---------------|------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 mA | G150 (2013) | 28 cm          | 10 %          | 1                |
| G150 (2013) SH28 C25 mA | G150 (2013) | 28 cm          | 25 %          | 1                |
| G150 (2013) SH50 C10 mA | G150 (2013) | 50 cm          | 10 %          | 2                |
| G150 (2013) SH50 C25 mA | G150 (2013) | 50 cm          | 25 %          | 2                |
| G210 (2013) SH28 C10 mA | G210 (2013) | 28 cm          | 10 %          | 1                |
| G210 (2013) SH28 C25 mA | G210 (2013) | 28 cm          | 25 %          | 1                |
| G210 (2013) SH50 C10 mA | G210 (2013) | 50 cm          | 10 %          | 2                |
| G210 (2013) SH50 C25 mA | G210 (2013) | 50 cm          | 25 %          | 2                |

### 3.5.2.2 Auswertung und Ergebnisse

In Abbildung 3-117 sind die Verläufe der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd,i,mA}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Stöße dargestellt. Auch hier kommt es mit steigender Anzahl der Stöße kommt es zu einem Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd,i,mA}$ , wobei der Zuwachs innerhalb der ersten 3 Stöße am stärksten ausgeprägt ist. Dies wird auf den fehlenden Formschluss zwischen der Oberfläche der GSG-Schicht und der Lastplatte vor dem 1. Stoß zurückgeführt.

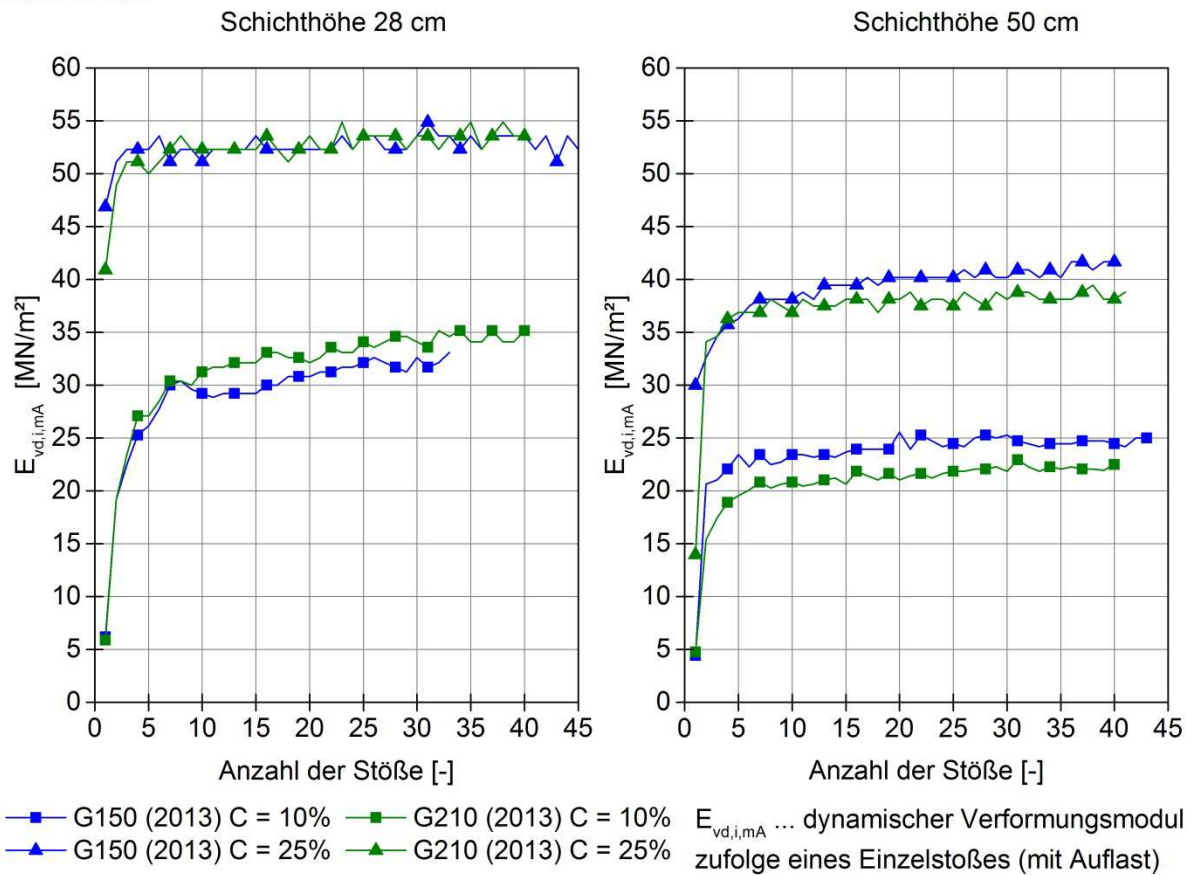


Abbildung 3-117: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd,i, mA}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Stöße je Materialtyp für Proben mit Auflast

In Tabelle 3-33 sind die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  als Mittelwert der Stöße 4 ÷ 6 und die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA, Ende}$  als Mittelwert der 3 letzten Stöße je Probe angeführt.

Tabelle 3-33: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  und Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls je Probe mit Auflast

| Probe                   | $E_{vd, mA}^{1)}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{vd, mA, Ende}^{2)}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Zuwachs <sup>3)</sup><br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Zuwachs <sup>4)</sup><br>[%] |
|-------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 mA | 26,4                                      | 32,3                                            | 5,9                                           | 22%                          |
| G150 (2013) SH28 C25 mA | 52,7                                      | 53,2                                            | 0,5                                           | 1%                           |
| G150 (2013) SH50 C10 mA | 22,6                                      | 24,7                                            | 2,1                                           | 9%                           |
| G150 (2013) SH50 C25 mA | 36,5                                      | 41,4                                            | 4,9                                           | 13%                          |
| G210 (2013) SH28 C10 mA | 27,6                                      | 34,4                                            | 6,8                                           | 25%                          |
| G210 (2013) SH28 C25 mA | 50,8                                      | 54,0                                            | 3,2                                           | 6%                           |
| G210 (2013) SH50 C10 mA | 19,5                                      | 22,2                                            | 2,7                                           | 14%                          |
| G210 (2013) SH50 C25 mA | 36,7                                      | 38,4                                            | 1,7                                           | 5%                           |

<sup>1)</sup> Mittelwert aus den Stößen 4 ÷ 6

<sup>3)</sup> Differenz aus  $E_{vd, mA, Ende}$  und  $E_{vd, mA}$

<sup>2)</sup> Mittelwert aus den letzten 3 Stößen

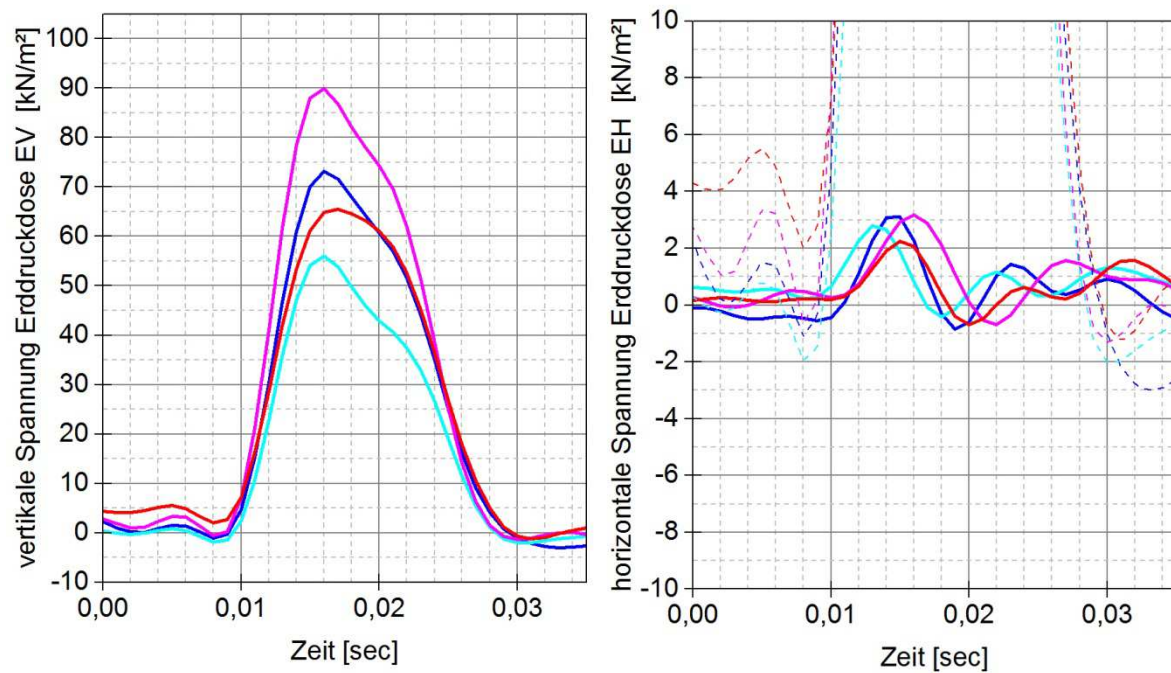
<sup>4)</sup> Quotient aus Zuwachs [MN/m<sup>2</sup>] und  $E_{vd, mA}$

Vergleicht man die Ergebnisse der Versuche, so zeigen sich folgende Zusammenhänge, welche mit jenen Versuchen ohne seitlicher Auflast identisch sind.

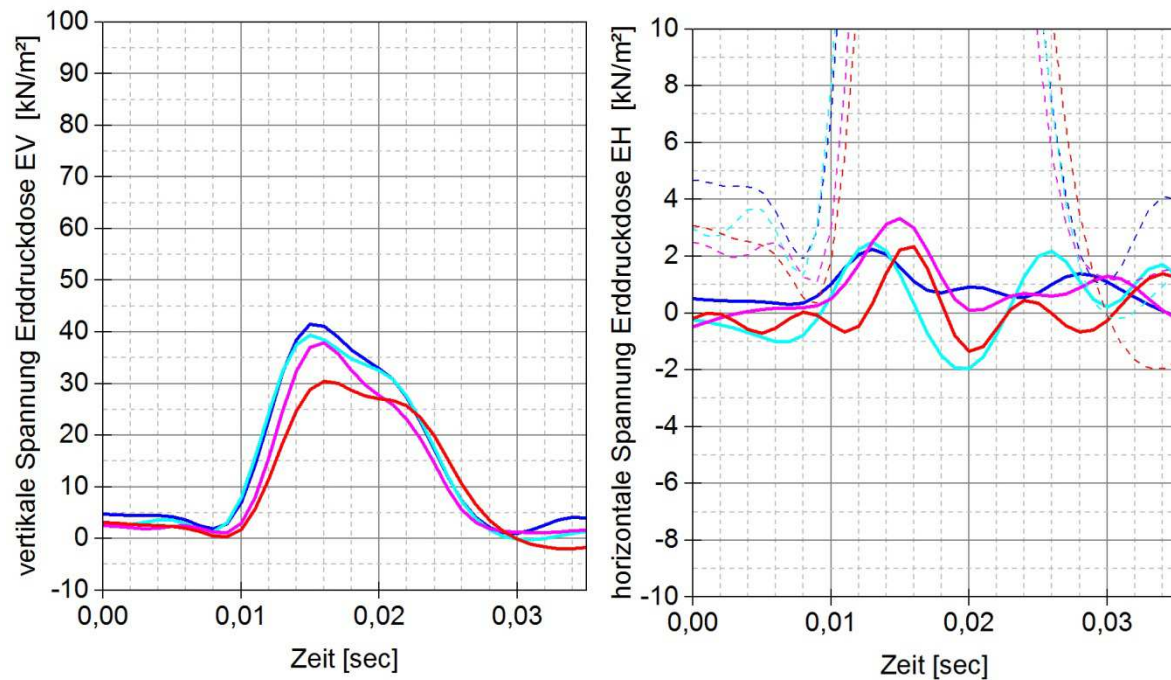
- Für die Größe des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA}$  ist das Maß der Verdichtung C von maßgebender Bedeutung.
- Die Variation der Materialtypen hat nur einen geringen Einfluss auf den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  und liegt innerhalb der Streubreite der Versuchsergebnisse.
- Die dynamischen Verformungsmoduln werden von der Schichthöhe SH beeinflusst. So resultieren aus dem Last-Verformungsverhalten der Proben mit einer Schichthöhe SH = 28 cm höhere dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  als bei einer Schichthöhe von 50 cm.

Abbildung 3-118 zeigt die Verläufe der Spannungen in Abhängigkeit von der Zeit, welche mit den Erddruckdosen EH und EV während des 5. Stoßes gemessen wurden. Mit einem größeren Maß der Verdichtung C kommt es zu einer Reduktion der maximalen vertikalen Spannungen am Boden des Versuchsbehälters, was auf eine Verbesserung der Lastverteilung innerhalb der Proben bei einer höheren Verdichtung zurückgeführt wird. Mit der Erddruckdose EH konnten zufolge der stoßförmigen Belastung keine nennenswerten Spannungen gemessen werden. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Versuche kaum durch die nahezu starren Seitenwände beeinflusst wurden.

Messdaten Erddruckdosen - Proben mit Auflast  
Labor: TU Wien  
Schichthöhe 28 cm



Messdaten Erddruckdosen - Proben mit Auflast  
Labor: TU Wien  
Schichthöhe 50 cm



— G150 (2013) C10 St5      — G210 (2013) C10 St5  
— G150 (2013) C25 St5      — G210 (2013) C25 St5

St5 ... 5. Stoß

Abbildung 3-118: Messdaten der Erddruckdosen EH und EV für den 5. Stoß in Abhängigkeit von der Schichthöhe SH, der Verdichtung C und des Materialtyps für Proben mit Auflast

Abbildung 3-119 zeigt den Zusammenhang zwischen der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  und dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$ . Dieser besitzt ebenfalls nur eine sehr geringe Korrelation.

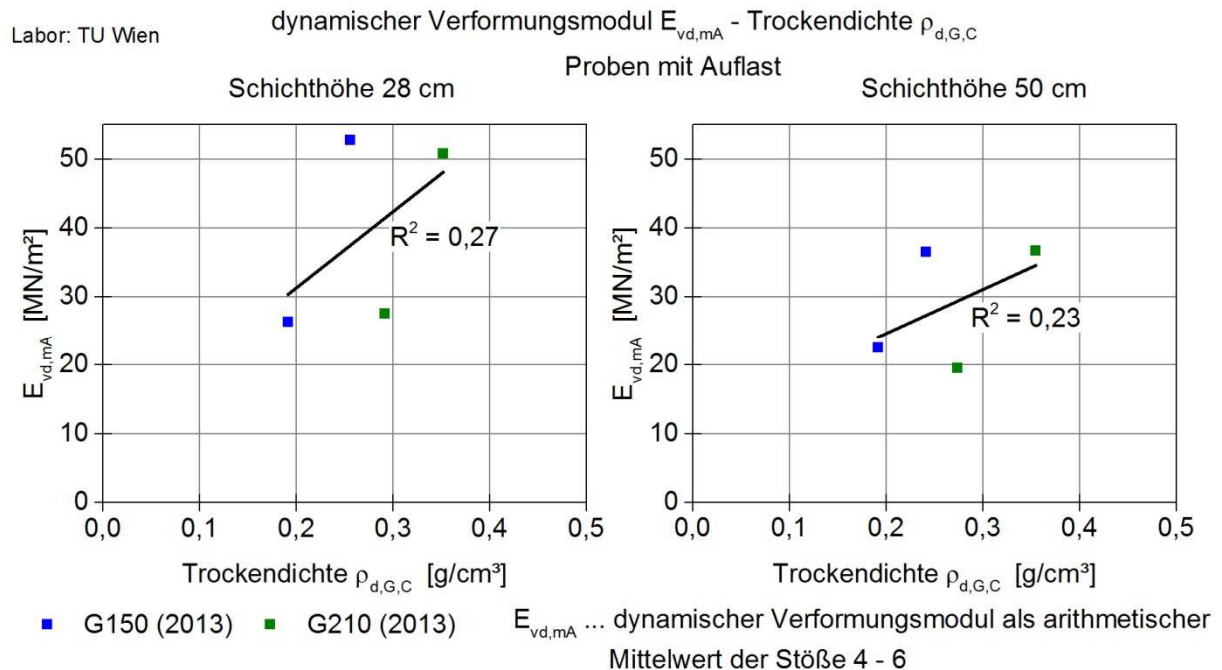


Abbildung 3-119: Dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_{d,G,C}$  für Proben mit Auflast

### 3.5.3 Vergleich zwischen den Versuchen mit und ohne Auflast

In Tabelle 3-34 sind die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  und  $E_{vd, mA}$  (Mittelwert der Stöße 4 ÷ 6) dargestellt. Es zeigt sich, dass der Auflastring rund um die Lastplatte zu höheren dynamischen Verformungsmoduln führt.

Tabelle 3-34: Vergleich zwischen den dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  und  $E_{vd, mA}$

| Probe                | $E_{vd}^{1)}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Probe                   | $E_{vd, mA}^{2)}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Anstieg <sup>3)</sup><br>[%] |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 | 27,0                                  | G150 (2013) SH28 C10 mA | 26,4                                      | -2%                          |
| G150 (2013) SH28 C25 | 33,3                                  | G150 (2013) SH28 C25 mA | 52,7                                      | 58%                          |
| G150 (2013) SH50 C10 | 14,7                                  | G150 (2013) SH50 C10 mA | 22,6                                      | 54%                          |
| G150 (2013) SH50 C25 | 30,6                                  | G150 (2013) SH50 C25 mA | 36,5                                      | 19%                          |
| G210 (2013) SH28 C10 | 23,7                                  | G210 (2013) SH28 C10 mA | 27,6                                      | 16%                          |
| G210 (2013) SH28 C25 | 39,3                                  | G210 (2013) SH28 C25 mA | 50,8                                      | 29%                          |
| G210 (2013) SH50 C10 | 15,3                                  | G210 (2013) SH50 C10 mA | 19,5                                      | 27%                          |
| G210 (2013) SH50 C25 | 28,2                                  | G210 (2013) SH50 C25 mA | 36,7                                      | 30%                          |

1) Mittelwert aus den Stößen 4 ÷ 6 – Versuche an Proben ohne einer Auflast

2) Mittelwert aus den Stößen 4 ÷ 6 – Versuche an Proben mit einer Auflast

3) Anstieg des dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  in Bezug auf  $E_{vd}$

Bei den Versuchen an Proben mit und ohne Auflast kam es bei steigender Anzahl der Stöße zu einem Zuwachs der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  bzw.  $E_{vd, mA}$  (s. Abbildung 3-113 und Abbildung 3-117).

Tabelle 3-35: Vergleich der Zuwächse der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  bzw.  $E_{vd, mA}$  zwischen den Proben mit und ohne Auflast

| Probe                | Zuwachs <sup>1)</sup><br>ohne Auflast<br>[%] | Probe                   | Zuwachs <sup>2)</sup><br>mit Auflast<br>[%] |
|----------------------|----------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 | 27%                                          | G150 (2013) SH28 C10 mA | 22%                                         |
| G150 (2013) SH28 C25 | 24%                                          | G150 (2013) SH28 C25 mA | 1%                                          |
| G150 (2013) SH50 C10 | 31%                                          | G150 (2013) SH50 C10 mA | 9%                                          |
| G150 (2013) SH50 C25 | 13%                                          | G150 (2013) SH50 C25 mA | 13%                                         |
| G210 (2013) SH28 C10 | 27%                                          | G210 (2013) SH28 C10 mA | 25%                                         |
| G210 (2013) SH28 C25 | 10%                                          | G210 (2013) SH28 C25 mA | 6%                                          |
| G210 (2013) SH50 C10 | 36%                                          | G210 (2013) SH50 C10 mA | 14%                                         |
| G210 (2013) SH50 C25 | 11%                                          | G210 (2013) SH50 C25 mA | 5%                                          |
| <b>Mittelwert</b>    | <b>22%</b>                                   |                         | <b>12%</b>                                  |

1) siehe Tabelle 3-31

2) siehe Tabelle 3-33



Die Zuwächse der dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd, mA}$  sind bei den Versuchen mit Auflast geringer als bei den Versuchen an den Proben ohne Auflast. Dies kann auf Folgendes zurückgeführt werden:

- Durch die Auflast kommt es zu einer Erhöhung der Spannungen im Korngerüst. Dies führt zu einem verbesserten Formschluss zwischen den Einzelkörnern (= Erhöhung der Kornverspannung) und somit werden Auflockerungen im Korngerüst und die seitliche Verdrängung der Körner zufolge der stoßförmigen Belastung reduziert.
- Durch die Reduzierung der Auflockerungen im Korngerüst durch die ringförmige Auflast bleibt die Kornverspannung nach jedem Stoß erhalten und es kommt zu einem deutlich geringeren Zuwachs des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd, mA}$ .

Die oben angeführten Punkte werden durch einen Vergleich zwischen den gemessenen Spannungen der Erddruckdosen EV der Proben mit und ohne der Auflast bestätigt. Die vertikalen Spannungen, welche zufolge des 5. Stoßes bei 28 cm bzw. 50 cm Tiefe unterhalb der Lastplatte gemessen wurden, sind bei den Proben mit Auflast geringer (s. Abbildung 3-120 und Tabelle 3-33).

# Messdaten Erddruckdose EV

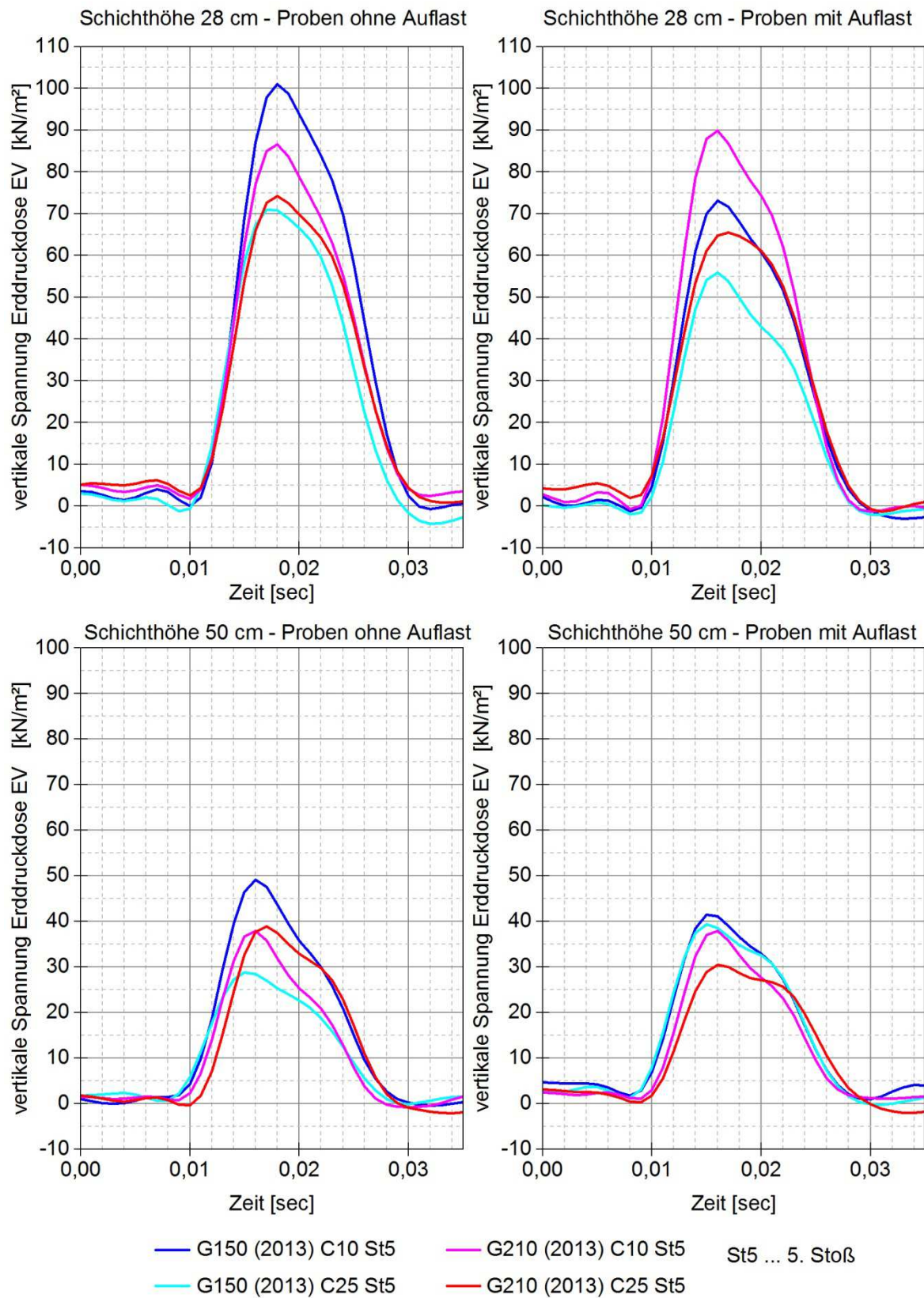


Abbildung 3-120: Messdaten der Erddruckdose EH je Materialtyp in Abhängigkeit von der Schichthöhe SH und Verdichtung C für Proben mit und ohne Auflast

*Tabelle 3-36: Vergleich zwischen den Versuchen mit und ohne Auflast in Hinblick auf die mit der Erddruckdose EV gemessenen maximalen vertikalen Spannungen je Probe*

| Probe                | max. vertikale Spannung EV<br>ohne Auflast<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | Probe                   | max. vertikale Spannung EV<br>mit Auflast<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| G150 (2013) SH28 C10 | 101,1                                                              | G150 (2013) SH28 C10 mA | 73,1                                                              |
| G210 (2013) SH28 C10 | 86,6                                                               | G210 (2013) SH28 C10 mA | 89,9                                                              |
| G150 (2013) SH28 C25 | 70,8                                                               | G150 (2013) SH28 C25 mA | 56,0                                                              |
| G210 (2013) SH28 C25 | 74,2                                                               | G210 (2013) SH28 C25 mA | 65,5                                                              |
| <b>Mittelwert</b>    | <b>83,2</b>                                                        |                         | <b>71,1</b>                                                       |
| G150 (2013) SH50 C10 | 49,1                                                               | G150 (2013) SH50 C10 mA | 41,4                                                              |
| G210 (2013) SH50 C10 | 37,7                                                               | G210 (2013) SH50 C10 mA | 37,8                                                              |
| G150 (2013) SH50 C25 | 38,9                                                               | G150 (2013) SH50 C25 mA | 39,0                                                              |
| G210 (2013) SH50 C25 | 28,8                                                               | G210 (2013) SH50 C25 mA | 30,5                                                              |
| <b>Mittelwert</b>    | <b>38,6</b>                                                        |                         | <b>37,1</b>                                                       |

Unabhängig von einer angeordneten Auflast zeigen die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät, dass das Maß der Verdichtung von GSG-Schichten anhand des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  bzw.  $E_{vd, mA}$  beurteilt werden kann. Eine höhere Verdichtung C der Proben führt zu einem höheren dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  bzw.  $E_{vd, mA}$ .

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den Versuchen an Proben mit und ohne Auflast zeigt, dass es durch die stoßförmige Belastung des dynamischen Lastplattenversuchs bei den Proben ohne Auflast zu Materialverdrängungen bzw. zu Auflockerungen im Korngefüge der Proben kommt, was zu einer Reduktion des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  führt. Es kommt somit zu einer Reduktion der nach der Verdichtung vorliegenden Kornverspannungen durch die dynamischen Lastplattenversuche.

Der durch die Verdichtung hergestellte Formschluss zwischen den Körnern (= Kornverspannung) bleibt während der dynamischen Lastplattenversuche an Proben bei Verwendung einer seitlichen Auflast nahezu erhalten. Somit repräsentiert der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$  das Last- Verformungsverhalten der GSG – Schicht unmittelbar nach der Verdichtung.

### 3.6 Dynamischer Lastplattenversuch – Felduntersuchungen

In der Praxis wurden bis dato bei großflächigen Einbauten oft Walzenzüge verwendet. Bei genaueren Untersuchungen dieser Einbautechnologie wurde festgestellt, dass die linienförmigen Lasten unter den Walzen keine optimale Verdichtung ermöglichen. Da handgeführte Plattenrüttler bei großen Bauvorhaben unwirtschaftlich sind, wurde nach einer effektiveren Verdichtungstechnologie gesucht. Gemeinsam mit der Firma Stehr wurden zwei 1 m breite, von einem Bobcat geführte, Plattenflächenrüttler entwickelt. Die beiden Flächenplattenrüttler unterschieden sich lediglich durch ihr Gewicht von 900 kg bzw. 2.000 kg. Auf einem Versuchsfeld der Firma Stehr wurde eine Versuchstrecke mit 55 cm GSG Material aufgeschüttet. Nach erfolgten Verdichtungsübergängen mit dem neu entwickelten Flächenverdichter wurden  $E_{vd}$  Werte von 11 (erster Verdichtungsübergang) bis 41 MN/m<sup>2</sup> erreicht. Die Versuche bei der Firma Stehr belegen eindeutig, dass Plattenflächenrüttler, welche von einem raupengeführten Trägergerät geführt werden, wesentlich bessere Verdichtungsergebnisse erzielen, als dies mit einem Walzenzug oder mit leichten Rüttelpatten möglich ist.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung einer Diplomarbeit an der Technischen Universität und Bergakademie Freiberg wurden Untersuchungen zur Verdichtung und zum Nachweis mit verschiedenen Prüfmethoden durchgeführt. Neben den dynamischen Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz wurden auf den gleichen Versuchsfeldern auch statische Lastplattenversuche durchgeführt. Die Ergebnisse ermöglichen den Vergleich zwischen  $E_{vd}$ -Werte (Leichtes Fallgewichtsgesetz) und  $E_{v-2}$ -Werten (statischer Lastplattenversuch, Wiederbelastung). Nachfolgende Versuchsergebnisse wurden erzielt.

*Tabelle 3-37: Übersicht zu den Messergebnissen der dynamischen und statischen Lastplattenversuchen an fertiggestellten GSG-Schichten für diverse Bauvorhaben*

| Versuch | Lage | Gesamte Schichthöhe [cm] | Verdichtung C | $E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{v1} / E_{v2}$ | $E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{v2} / E_{vd}$ |
|---------|------|--------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| 1       | 1    | 25                       | 23%           | 12,40                         | 61,10                         | 4,93              | 36,23                         | 1,69              |
| 1       | 2    | 50                       | 23%           | 12,50                         | 68,30                         | 5,46              | 31,08                         | 2,20              |
| 2       | 1    | 25                       | 16%           | 10,60                         | 62,30                         | 5,88              | 31,60                         | 1,97              |
| 2       | 2    | 50                       | 16%           | 11,90                         | 66,30                         | 5,57              | 24,94                         | 2,66              |

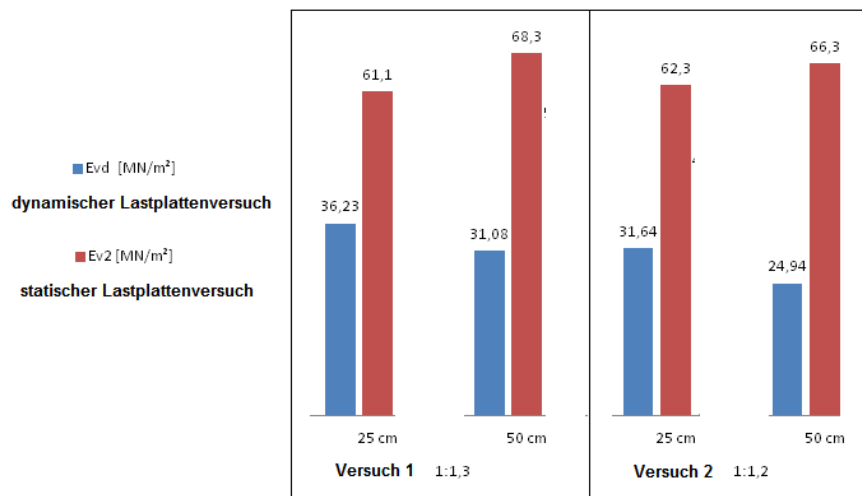


Abbildung 3-121: Vergleich zwischen den Werten des dynamische Verformungsmoduls  $E_{vd}$  und den Werten der Wiederbelastung des statischen Lastplattenversuchs  $E_{v2}$

Die Verdichtung erfolge mit einer sehr kleinen Vibrationsplatte. Das Verhältnis  $E_{v,dyn} / E_{v-2}$  lag wertemäßig im Bereich von 1,69 bis 2,66, mit einem Mittelwert von 2,13.

Die parallel durchgeführten Versuche mit dem „Mittelschweren Fallgewichtsgerät“ (15 kg) haben keine wesentlichen Unterschiede zum 10 kg Fallgewicht ergeben. Aus diesem Grund wurde auf weitere Untersuchungen mit dem „Mittelschweren Fallgewichtsgerät“ (15 kg) verzichtet.

In den Jahren 2012 und 2013 hat Technopor umfangreiche Messungen zur Kontrolle der durchgeführten Verdichtung der jeweiligen GSG-Schichten auf diversen Baustellen durchgeführt. Dazu wurde der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät angewendet.

Eine detaillierte Übersicht der durchgeführten Messungen, mit Informationen über die vorhandenen Randbedingungen und den Ergebnissen, können Tabelle 3-38 und Tabelle 3-39 entnommen werden.

*Tabelle 3-38: Übersicht über Messungen an Baustellen*

| Baustelle                                  | Datum      | Material        | Schicht-<br>höhe<br>[cm] | Verdichtung<br>C | Verdichtungsart                |
|--------------------------------------------|------------|-----------------|--------------------------|------------------|--------------------------------|
| Kindertagesstätte<br>Cölbe                 | 26.04.2012 | Perimeter<br>50 | 50                       | 20%              | Rüttelplatte<br>80 kg / 50 cm  |
| Industriehalle<br>Erlenbach                | 11.05.2012 | Perimeter<br>50 | 15                       | 23%              | Rüttelplatte<br>100 kg / 50 cm |
| Logistikcenter<br>Wuppertal                | 30.05.2012 | Perimeter<br>50 | 30                       | 23%              | Rüttelplatte<br>100 kg / 50 cm |
| Gewerbegebäude<br>Ansbach                  | 18.09.2012 | Perimeter<br>50 | 27                       | 20%              | Rüttelplatte<br>80 kg / 50 cm  |
| Brückenrampe<br>Port Bremerhaven           | 08.01.2013 | Straßenbau      | 40                       | 16%              | Stehrplatte<br>250 cm          |
| Industriehalle<br>Berlin<br>Markgrafendamm | 16.04.2013 | Perimeter<br>50 | 30                       | 23%              | Rüttelplatte<br>120 kg / 55 cm |
| Markt<br>Chemnitz                          | 21.05.2013 | Perimeter<br>50 | 25                       | 20%              | Rüttelplatte<br>80 kg / 50 cm  |
| Kindertagesstätte<br>Goya - Leipzig        | 09.04.2013 | Perimeter<br>50 | 25                       | 20%              | Rüttelplatte<br>80 kg / 50 cm  |
| Einfamilienhaus<br>Hannover<br>Münden      | 29.05.2013 | Perimeter<br>50 | 30                       | 16%              | Rüttelplatte<br>80 kg / 50 cm  |



*Tabelle 3-39: Ergebnisse der „Baustellenmessungen“*

| Baustelle                                  | Mittlerer<br>$E_{vd}$ Planum<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Mittlerer<br>$E_{vd}$ GSG<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Standard-<br>abweichung GSG<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Variations-<br>koeffizient GSG<br>[%] |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Kindertagesstätte<br>Cölbe                 | 45,0                                                 | 16,0                                              | 2,07                                                | 12,96                                 |
| Industriehalle<br>Erlenbach                | 50,0                                                 | 59,4                                              | 8,84                                                | 14,89                                 |
| Logistikcenter<br>Wuppertal                | 82,4                                                 | 63,4                                              | 8,23                                                | 13,00                                 |
| Gewerbegebäude<br>Ansbach                  | 50,0                                                 | 18,2                                              | 3,14                                                | 17,26                                 |
| Brückenrampe<br>Port Bremerhaven           | 9,0                                                  | 16,9                                              | 3,86                                                | 22,87                                 |
| Industriehalle<br>Berlin<br>Markgrafendamm | 60,0                                                 | 27,4                                              | 35,05                                               | 31,21                                 |
| Markt<br>Chemnitz<br>Chemnitz              | 65,0                                                 | 34,1                                              | 45,73                                               | 40,91                                 |
| Kindertagesstätte<br>Goya - Leipzig        | 55,8                                                 | 21,0                                              | 24,00                                               | 22,54                                 |
| Einfamilienhaus<br>Hannover Münden         | 45,2                                                 | 15,2                                              | 21,00                                               | 18,84                                 |

Die durchgeführten Versuche mit dem „Leichten Fallgewichtsgerät“ haben bestätigt, dass eine Prüfung der Verdichtung von Glasschaumgranulat auf Baustellen mit dieser Prüfmethode geeignet ist. Es sind jedoch die entsprechenden Randbedingungen (Steifigkeit Planum, Schichtstärke GSG, Einbaulagenstärke, Verdichtung C, Art der Verdichtung etc.) zu berücksichtigen.

## 4 Zusammenfassung der Ergebnisse in Hinblick auf die Arbeitspakete

### 4.1 AP1 –Versuche UIBK

Innerhalb dieses Arbeitspaketes erfolgte die Durchführung von insgesamt 153 großmaßstäblichen Versuchen zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens von Glasschaumgranulatschichten. Innerhalb der Versuche wurde die Art des Materials (unterschiedliche Schüttdichten der Glasschaumgranulatschüttung - 150 bis 210 kg/m<sup>3</sup>), die Breite der Lasteinleitungsfläche (0,5 bis 1,0 m), die Schichthöhe (15 bis 50 cm), das Maß der Verdichtung (10% ÷ 25%) und die Art des Einbaues (1-lagig oder 2-lagig) variiert.

Eine detaillierte Übersicht über die durchgeführten Versuche und die zugehörigen Ergebnisse können dem Abschnitt 3.4 entnommen werden.

Auf Basis der ermittelten Verformungsmoduln  $E_v$  wurden auch statistische Untersuchungen durchgeführt. Bei gleichen Randbedingungen (Materialtyp, Verdichtung, Laststempelbreite, Schichthöhe) wurde die 5%-Fraktile der Normalverteilung des Verformungsmoduls  $E_v$  nach Gauß ermittelt. Aufgrund der zum Teil sehr großen Streuungen der Verformungsmoduln  $E_{v1}$  ergaben sich für die 5%-Fraktile zum Teil negative Werte, die rein mathematisch zwar möglich sind, in der Realität jedoch nicht auftreten können.

Mit einer statistischen Untersuchung auf Basis einer Lognormalen-Verteilung können negative Werte für die 5%-Fraktile des Verformungsmoduls ausgeschlossen werden, es ergeben sich aber sehr niedrige Werte in einem Bereich von ca. 0,05 bis 0,5 MN/m<sup>2</sup>, die das tatsächliche Last-Verformungsverhalten von GSG-Schichten nicht realistisch darstellen.

Für die statistische Beurteilung der Versuchsergebnisse sind folglich noch weitere Untersuchungen notwendig, da diese eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von charakteristischen Bemessungswerten für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit gemäß der aktuellen Normung darstellen.

### 4.2 AP2 – Setzungen

Die Prognose der zu erwartenden Setzungen ist ein wesentlicher Bestandteil im Hinblick auf die Sicherstellung von Anforderungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit von Gebäuden.

Allgemein kann die Berechnung von Bauwerksetzungen wie folgt beschrieben werden:

- Berechnung der Spannungen  $\sigma_{z,0}$  in der Fundamentsohle
- Ermittlung der setzungswirksamen Spannungen  $\sigma_{z,0,eff}$  in der Fundamentsohle
- Ermittlung des Verlaufes der setzungswirksamen Spannungen  $\sigma_{z,z,eff,i}$  in den einzelnen Bodenschichten bis zur Grenztiefe

- Berechnung der mittleren setzungswirksamen Spannung  $\sigma_{z,z,eff,i,m}$  je Bodenschicht.
- Für jede einzelne Bodenschicht (i) wird unter Berücksichtigung des zugehörigen Steifemoduls  $E_{s,Boden,i}$  und der zugehörigen Schichthöhe  $SH_{Boden,i}$ , die Verformungen  $s_{Boden,i}$  wie folgt berechnet:

$$s_{Boden,i} = \frac{\sigma_{z,z,eff,i,m}}{E_{s,Boden,i}} \cdot SH_{Boden,i} \quad (4-1)$$

mit:

|                        |                                                    |
|------------------------|----------------------------------------------------|
| $s_{Boden,i}$          | Verformung der einzelnen Bodenschicht (i)          |
| $\sigma_{z,z,eff,i,m}$ | mittlere setzungswirksame Spannung je Bodenschicht |
| $E_{s,Boden,i}$        | Steifemodul je Bodenschicht                        |
| $SH_{Boden,i}$         | Schichthöhe der Bodenschicht                       |

- Durch Aufsummierung aller ermittelten Verformungen  $s_{Boden,i}$  der Bodenschichten kann die Gesamtsetzung  $s_F$  des Bauwerks berechnet werden.

$$s_F = \sum s_{Boden,i} \quad (4-2)$$

mit:

|               |                                           |
|---------------|-------------------------------------------|
| $s_F$         | Gesamtsetzung des Bauwerks                |
| $s_{Boden,i}$ | Verformung der einzelnen Bodenschicht (i) |

Die Ergebnisse der bodenmechanischen Untersuchungen (siehe Abschnitt 3) zeigen die prinzipielle Eignung von GSG-Schichten als lastabtragende Schicht unterhalb von Fundierungen auf. Im Zuge einer Setzungsberechnung kann eine GSG-Schicht somit wie eine herkömmliche Bodenschicht berücksichtigt werden. In Anlehnung an die Gleichung (4-1) wird die Verformung der GSG-Schicht  $s_{GSG}$  wie folgt berechnet:

$$s_{GSG} = \frac{\sigma_{z,0}}{E_{s1,GSG}} \cdot SH_{GSG} \quad (4-3)$$

mit:

|                |                                               |
|----------------|-----------------------------------------------|
| $s_{GSG}$      | Verformung der GSG-Schicht                    |
| $E_{s1,GSG}$   | Steifemodul der Erstbelastung der GSG-Schicht |
| $SH_{GSG}$     | Schichthöhe der GSG-Schicht                   |
| $\sigma_{z,0}$ | Spannung in der Fundamentsohle                |

Für die Berechnung der Verformung der GSG-Schicht  $s_{GSG}$  ist unter anderem die Kenntnis des Steifemoduls  $E_{s1}$  notwendig.

An der Universität Innsbruck wurden umfangreiche Untersuchungen an verdichteten GSG-Schichten durchgeführt. Aus diesen Versuchen wurden Verformungsmoduln  $E_{v1}$  abgeleitet. Um diese Verformungsmoduln  $E_{v1}$  in Hinblick auf eine Setzungsberechnung verwenden zu können, müssen die Verformungsmoduln  $E_{v1}$  in Steifemoduln  $E_{s1}$  umgerechnet werden. Für die Umrechnung wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

Auf Basis der Theorie des elastisch isotropen Halbraums und der Ergebnisse der großmaßstäblichen Versuche wird unter Berücksichtigung der folgenden Werte der E-Modul E (Youngs-Modul) der GSG-Schicht abgeleitet:

- FB Breite des Laststempels
- SH Schichthöhe der GSG-Schicht
- $\sigma$  mittlere Spannung unter dem Laststempel
- $s_{GSG}$  Verformung der GSG-Schicht
- $\nu$  Querdehnzahl der GSG-Schicht

Allgemein kann der E-Modul E mit Gleichung (4-4) auf Basis der oben angeführten Punkte für eine GSG-Schicht unterhalb eines unendlich langen Streifenfundaments wie folgt berechnet werden [Kézdi 1970].

$$E = \frac{FB \cdot \sigma}{\pi \cdot s_{GSG}} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left[ 2 \ln \cot \frac{\beta}{2} - \frac{1}{1 - \nu} \cdot \cos \beta \right] \quad (4-4)$$

Der in Gleichung (4-5) angeführte Winkel  $\beta$  wird wie folgt berechnet:

$$\beta = \arctan \frac{\frac{FB}{2}}{SH} \quad (4-5)$$

Wie bereits oben dargestellt, ist für die Setzungsberechnung der Steifemodul  $E_s$  erforderlich. Durch Einsetzen der Gleichung (4-4) in Gleichung (4-6)

$$E = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{1 - \nu} \cdot E_s \quad (4-6)$$

kann der Steifemodul  $E_s$  wie folgt ermittelt werden:

$$\frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{1 - \nu} \cdot E_s = \frac{FB \cdot \sigma}{\pi \cdot s_{GSG}} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left[ 2 \ln \cot \frac{\beta}{2} - \frac{1}{1 - \nu} \cdot \cos \beta \right] \quad (4-7)$$

$$E_s = \frac{FB \cdot \sigma}{\pi \cdot s_{GSG}} \cdot \frac{(1 - \nu)^2}{(1 - 2 \cdot \nu)} \cdot \left[ 2 \ln \cot \frac{\beta}{2} - \frac{1}{1 - \nu} \cdot \cos \beta \right] \quad (4-8)$$

Auf Basis des Verformungsmoduls  $E_v$  kann die Verformung der GSG Schicht s unter Verwendung des folgenden Zusammenhanges dargestellt werden

$$E_v = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\frac{s_{GSG}}{SH}} = \frac{\sigma \cdot SH}{s_{GSG}} \quad (4-9)$$

$$s_{GSG} = \frac{\sigma \cdot SH}{E_v} \quad (4-10)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (4-10) in (4-8) erhält man den Steifemodul  $E_s$  zu:

$$E_s = \frac{FB \cdot E_v}{\pi \cdot SH} \cdot \frac{(1 - \nu)^2}{(1 - 2 \cdot \nu)} \cdot \left[ 2 \ln \cot \frac{\beta}{2} - \frac{1}{1 - \nu} \cdot \cos \beta \right] \quad (4-11)$$

Wie aus Formel (4-11) ersichtlich, kann der Steifemodul  $E_s$  auf Basis des Verformungsmoduls  $E_v$ , der GSG-Schichthöhe SH, des Winkels  $\beta$ , der Breite des Laststempels FB sowie der

Querdehnzahl  $\nu$  berechnet werden. Für die Querdehnzahl  $\nu$  liegt aktuell kein allgemein gültiger Wert vor.

Im Folgenden wird eine theoretische Methode beschrieben, um auf Basis von den durchgeführten großmaßstäblichen Versuchen und den Kurzzeit-Kompressionsversuchen im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 x 500 mm die Querdehnzahl  $\nu$  zu ermitteln.

- Im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 x 500 mm wurden Kurzzeit-Kompressionsversuche durchgeführt, welche hinsichtlich der Laststeigerung mit den Versuchen des AP1 vergleichbar sind. Auf Basis der in Tabelle 4-1 angeführten Kurzzeit-Kompressionsversuchen wurden die Steifemoduln  $E_s$  der Proben 1 bis 6 ermittelt.
- Ermittlung der Verformungsmoduln  $E_v$  anhand der großmaßstäblichen Versuchen (siehe Abschnitt 3.4) für die in Tabelle 4-1 angeführten Materialtypen und Verdichtungen C.
- Einsetzen der Verformungsmoduln  $E_v$ , der zugehörigen Schichthöhen SH und der zugehörigen Laststempelbreite FB aus dem jeweiligen großmaßstäblichen Versuch und der zugehörigen Steifemoduln  $E_s$  aus den Kurzzeit-Kompressionsversuchen in Gleichung (4-11). Ermittlung der Querdehnzahl  $\nu$  aus diesem Zusammenhang.

*Tabelle 4-1: Durchgeführte Kurzzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 x 500 mm*

| Probe | Materialtyp | Verdichtung C |
|-------|-------------|---------------|
| 1     | G150 (2011) | 10%           |
| 2     | G150 (2011) | 25%           |
| 3     | G170 (2012) | 10%           |
| 4     | G170 (2012) | 25%           |
| 5     | G210 (2011) | 10%           |
| 6     | G210 (2011) | 25%           |

Die Umsetzung der oben beschriebenen Vorgehensweise ergab zum Teil negative Werte für die Querdehnzahlen  $\nu$ . Dies hätte bedeutet, dass während der großmaßstäblichen Versuche es zu einer Kontraktion des Korngemisches hätte kommen müssen, was aufgrund der sich während der Versuche seitlich des Laststempels einstellenden Aufwölbungen der Probenoberflächen aber ausgeschlossen werden konnte. Somit führt die oben beschriebene Methode zur Ermittlung der Querdehnzahl  $\nu$  zu keinen plausiblen Ergebnissen. Für die Ermittlung der Querdehnzahl  $\nu$  sind folglich weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann der Verformungsmodul  $E_v$  nicht in einen Steifemodul  $E_s$  umgerechnet werden. Daher werden für die Ermittlung der Verformungen der GSG-Schicht  $s_{GSG}$  die aus den durchgeführten Kompressionsversuchen resultierenden Steifemoduln verwendet.

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde eine Vielzahl von Kompressionsversuchen in verschiedenen großen Oedometern ( $\varnothing 250$  mm,  $500$  mm x  $500$  mm) durchgeführt (s. Abschnitt 3.3.4 - 3.3.8). Ein Vergleich der Ergebnisse der Kompressionsversuche mit den Ergebnissen der großmaßstäblichen Versuche zeigt, dass mit Langzeit-Kompressionsversuchen im Oedometer mit einem Querschnitt von  $500$  mm x  $500$  mm (s. Abschnitt 3.3.8) die Steifemoduln  $E_{S1}$  von GSG-Schichten im Labor realitätsnahe bestimmt werden können.

Basierend auf den Ergebnissen der Langzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Querschnitt von  $500$  mm x  $500$  mm (s. Abschnitt 3.3.8) sind in Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-4 die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  in Abhängigkeit von der Spannung je Materialtyp angeführt.

*Tabelle 4-2: Steifemoduln der Erstbelastung für den Materialtyp G150 (2011)*

| Materialtyp | Verdichtung C [%] | Spannung $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ] | Steifemodul $E_{S1,GSG}$ [MN/m <sup>2</sup> ] |
|-------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| G150 (2011) | 25                | 0 ÷ 100                                | 2,8                                           |
| G150 (2011) | 25                | 0 ÷ 200                                | 2,0                                           |
| G150 (2011) | 25                | 0 ÷ 300                                | 1,6                                           |

*Tabelle 4-3: Steifemoduln der Erstbelastung für den Materialtyp G170 (2012)*

| Materialtyp | Verdichtung C [%] | Spannung $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ] | Steifemodul $E_{S1,GSG}$ [MN/m <sup>2</sup> ] |
|-------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| G170 (2012) | 25                | 0 ÷ 100                                | 4,5                                           |
| G170 (2012) | 25                | 0 ÷ 200                                | 4,0                                           |
| G170 (2012) | 25                | 0 ÷ 300                                | 3,1                                           |

*Tabelle 4-4: Steifemoduln der Erstbelastung für den Materialtyp G210 (2011)*

| Materialtyp | Verdichtung C [%] | Spannung $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ] | Steifemodul $E_{S1,GSG}$ [MN/m <sup>2</sup> ] |
|-------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| G210 (2011) | 25                | 0 ÷ 100                                | 4,3                                           |
| G210 (2011) | 25                | 0 ÷ 200                                | 5,1                                           |
| G210 (2011) | 25                | 0 ÷ 300                                | 4,0                                           |

Somit können die Verformungen der GSG-Schichten  $s_{GSG}$  auf Basis der in Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-4 angeführten Steifemoduln  $E_{S1}$  und für Spannung von  $\sigma_{z,0} = 0 \div 300$  kN/m<sup>2</sup> in Abhängigkeit von der Schichthöhe  $SH_{GSG}$  mit Gleichung (4-3) berechnet werden.



Durch Aufsummierung der Verformungen der Bodenschichten  $s_{\text{Boden},i}$  und der Verformung der GSG-Schicht  $s_{\text{GSG}}$  ergibt sich die Gesamtsetzung  $s_{\text{F,GSG}}$  des Bauwerks auf einer GSG-Schicht:

$$s_{\text{F,GSG}} = s_{\text{GSG}} + \sum s_{\text{Boden},i} \quad (4-12)$$

mit:

$s_{\text{F,GSG}}$  Gesamtsetzung des Bauwerks auf einer GSG-Schicht  
 $s_{\text{GSG}}$  Verformung der GSG-Schicht  
 $s_{\text{Boden},i}$  Verformung der einzelnen Bodenschicht (i)

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels die Gesamtsetzung  $s_{\text{F,GSG}}$  berechnet werden. Die hierfür notwendigen Parameter wurden wie folgt gewählt:

- Größe der Bodenplatte: 10 m x 30 m
- Einbindetiefe der Bodenplatte: 0,30 m unter Geländeoberkante
- Spannungen in der Fundamentsohle:  $\sigma_{z,0} = 50 \text{ kN/m}^2$ ;  $100 \text{ kN/m}^2$
- Schichthöhe der GSG-Schicht:  $SH_{\text{GSG}} = 0,50 \text{ m}$
- Wichte des Untergrundes:  $\gamma_{\text{Boden}} = 20 \text{ kN/m}^3$
- Wichte der GSG-Schicht:  $\gamma_{\text{GSG}} = 3 \text{ kN/m}^3$
- Steifemodul der GSG-Schicht:  $E_{S1} = 3,0 \text{ MN/m}^2$
- Steifemoduln der Bodenschichten:  $E_{S,\text{Boden}} = 5 \text{ MN/m}^2$ ;  $25 \text{ MN/m}^2$ ;  $50 \text{ MN/m}^2$

Neben der Gesamtsetzung  $s_{\text{F,GSG}}$  mit GSG-Schicht wurde zusätzlich auch die Gesamtsetzung  $s_{\text{F}}$  der Bodenplatte ohne darunter befindliche GSG-Schicht berechnet, wobei die Eigenschaften der Bodenschichten und die Geometrie der Bodenplatte unverändert blieben.

In Tabelle 4-5 sind die Gesamtsetzungen  $s_{\text{F,GSG}}$  und  $s_{\text{F}}$  der Bodenplatte in Abhängigkeit der Spannung in der Fundamentsohle  $\sigma_{z,0}$  und der Steifemoduln  $E_{S,\text{Boden}}$  dargestellt.

*Tabelle 4-5: Gesamtsetzungen  $s_{\text{F,GSG}}$  und  $s_{\text{F}}$  in Abhängigkeit von den Spannungen  $\sigma_{z,0}$ , den Steifemoduln  $E_{S,\text{Boden}}$  und dem Steifemodul der GSG-Schicht  $E_{S1} = 3,0 \text{ MN/m}^2$*

|                                              | $\sigma_{z,0} = 50 \text{ kN/m}^2$ |                            |                                 | $\sigma_{z,0} = 100 \text{ kN/m}^2$ |                            |                                 |
|----------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| $E_{S,\text{Boden}}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $s_{\text{F}}$<br>[cm]             | $s_{\text{F,GSG}}$<br>[cm] | Verhältnis <sup>1)</sup><br>[-] | $s_{\text{F}}$<br>[cm]              | $s_{\text{F,GSG}}$<br>[cm] | Verhältnis <sup>1)</sup><br>[-] |
| 5                                            | 2,9                                | 3,2                        | 1,10                            | 10,4                                | 11                         | 1,06                            |
| 25                                           | 0,6                                | 0,9                        | 1,50                            | 2,1                                 | 2,7                        | 1,29                            |
| 50                                           | 0,3                                | 0,6                        | 2,00                            | 1,1                                 | 1,7                        | 1,55                            |

<sup>1)</sup> Quotient aus  $s_{\text{F,GSG}}$  und  $s_{\text{F}}$

Mit höher werdenden Steifemoduln der Bodenschichten und bei geringer werdenden Spannungen in der Fundamentsohle  $\sigma_{z,0}$  steigt der Einfluss der GSG-Schicht auf das Setzungsverhalten des Bauwerks.

### 4.3 AP3 – Bettungsmodul

Die Berechnung der Schnittgrößenverteilung innerhalb einer Bodenplatte erfolgt in der Praxis häufig auf Basis des sogenannten Bettungsmodulverfahrens, welches davon ausgeht, dass die Spannung in der Fundamentsohle direkt proportional zur Setzung der Bodenplatte in jedem Punkt ist. Der Proportionalitätsfaktor  $k_s$  wird als Bettungsmodul bezeichnet.

Basierend auf der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Setzungsberechnung wird der Bettungsmodul für einen beliebigen Bodenaufbau mit und ohne GSG-Schicht wie folgt ermittelt:

$$k_s = \frac{\sigma_{z,0}}{s_F} \quad \text{bzw.} \quad k_{s,GSG} = \frac{\sigma_{z,0}}{s_{F,GSG}} \quad (4-13)$$

mit:

$\sigma_{z,0}$  Spannung in der Fundamentsohle

$k_s$  Bettungsmodul ohne GSG-Schicht unter der Gründung

$s_F$  Gesamtsetzung des Bauwerks ohne GSG-Schicht unter der Gründung

$k_{s,GSG}$  Bettungsmodul bei Berücksichtigung einer GSG-Schicht unter der Gründung

$s_{F,GSG}$  Gesamtsetzung des Bauwerks mit GSG-Schicht

Somit kann auf Basis der Spannungen  $\sigma_{z,0}$  und den Setzungen  $s_F$  bzw.  $s_{F,GSG}$  der Bettungsmodul  $k_s$  bzw.  $k_{s,GSG}$  für das zuvor beschriebene Beispiel ermittelt werden (s. Tabelle 4-5).

*Tabelle 4-6: Bettungsmoduln  $k_s$  (ohne GSG) und  $k_{s,GSG}$  (mit GSG) der Bodenplatte zufolge eines Steifemoduls der GSG-Schicht  $E_{S1} = 3,0 \text{ MN/m}^2$*

| $E_{s,\text{Boden}}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma_{z,0} = 50 \text{ kN/m}^2$ |                                     |                                 | $\sigma_{z,0} = 100 \text{ kN/m}^2$ |                                     |                                 |
|----------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
|                                              | $k_s$<br>[MN/m <sup>3</sup> ]      | $k_{s,GSG}$<br>[MN/m <sup>3</sup> ] | Verhältnis <sup>1)</sup><br>[-] | $k_s$<br>[MN/m <sup>3</sup> ]       | $k_{s,GSG}$<br>[MN/m <sup>3</sup> ] | Verhältnis <sup>1)</sup><br>[-] |
| 5                                            | 1,7                                | 1,5                                 | 0,88                            | 1,0                                 | 0,9                                 | 0,90                            |
| 25                                           | 8,6                                | 5,6                                 | 0,65                            | 4,8                                 | 3,7                                 | 0,77                            |
| 50                                           | 17,1                               | 8,2                                 | 0,48                            | 9,6                                 | 6,0                                 | 0,63                            |

<sup>1)</sup> Quotient aus  $k_{s,GSG}$  und  $k_s$

Bei einem Steifemodul des Bodens, der größer ist als jener der GSG-Schicht, führt dies zu einer Abminderung des Bettungsmoduls des Gesamtsystems (s. Tabelle 4-6).

Der Einfluss der GSG-Schicht auf den Bettungsmodul der Bodenplatte ist insbesondere bei

- niedrigen Spannungen und
- bei hohen Steifemoduln der Bodenschicht gegenüber der GSG-Schicht

signifikant.

#### **4.4 AP4 – Grundbruch**

Die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit von Gebäuden basiert auf einer entsprechend dimensionierten Gründung des Gebäudes. Die Dimensionierung und die Ermittlung der Tragfähigkeit von seicht liegenden Gründungskörpern erfolgt üblicherweise mittels Grundbruchberechnungen.

Grundbruch tritt ein, wenn ein Gründungskörper so stark belastet wird, dass sich darunter Gleitbereiche im Baugrund ausbilden, in denen der Scherwiderstand des Bodens überwunden und der Boden seitlich verdrängt wird. Die in diesem Grenzzustand auftretende Last wird als Grundbruchlast bezeichnet.

Bei der Berechnung der Grundbruchlast einer Fundierung auf einer GSG-Schicht ist die Kenntnis des Scherwiderstandes der GSG-Schicht erforderlich, welche anhand von Scherversuchen im Rahmenschergerät und im Triaxialgerät im Zuge des Forschungsvorhabens ermittelt wurde. Die Ergebnisse der Triaxialversuche zeigen, dass für eine vollständige Mobilisierung der Scherparameter  $\phi$  und  $c$  von GSG-Schichten sehr große Verformungen auftreten (s. Abschnitt 3.3.10 bis Abschnitt 3.3.12).

Im Abschnitt 4.4.1 wird die normative Vorgangsweise zur Ermittlung der Grundbruchlast einer Gründung unter Berücksichtigung einer GSG-Schicht beschrieben, bei welcher die Verformungsverträglichkeit zwischen einer GSG-Schicht und einer Bodenschicht nicht berücksichtigt wird, weshalb die Scherdehnungen innerhalb der GSG-Sicht nicht beschränkt werden. Dies bedeutet, dass es vor dem Erreichen der Grundbruchlast zu unzulässig großen Verschiebungen der Gründung kommen kann, welche in weiterer Folge die Sicherstellung der Tragfähigkeit des Bauwerks gefährden können.

Über die normative Vorgangsweise hinaus wird im Abschnitt 4.4.2 im Zuge der Ermittlung der Grundbruchlast die Verformungsverträglichkeit zwischen einer GSG-Schicht und einer darunter befindlichen Bodenschicht berücksichtigt. Dadurch kommt es zu einer Beschränkung der Scherdehnungen innerhalb der GSG-Schicht bzw. wird die Verschiebung der Gründung beim Erreichen des Lastniveaus der Grundbruchlast limitiert. Damit kann die Tragfähigkeit des Bauwerks sichergestellt werden.

Im Abschnitt 4.4.3 werden die Grundbruchlasten mit und ohne Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit zwischen einer GSG-Schicht und einer Bodenschicht gegenübergestellt.

#### 4.4.1 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – Grundbruch

Für den Nachweis der Tragfähigkeit von Flächengründungen ist folgende Bedingung gemäß ÖNORM B 1997-1-1 einzuhalten:

$$V_d \leq Q_{f,d} \quad (4-14)$$

mit:

$V_d$  Bemessungswert der Einwirkung

$Q_{f,d}$  Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch

Der Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch berechnet sich wie folgt:

$$Q_{f,d} = \frac{Q_{f,k}}{\gamma_{R;v}} \quad (4-15)$$

mit:

$Q_{f,k}$  charakteristischer Widerstand gegen Grundbruch (Grundbruchlast)

$\gamma_{R;v}$  Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand – Grundbruch

Die Berechnung der Grundbruchlast  $Q_{f,k}$  von Flächengründungen in Hinblick auf das Versagensmodell mechanischer Grundbruch erfolgt an dieser Stelle nach dem Formelwerk der ÖNORM B 4435-2.

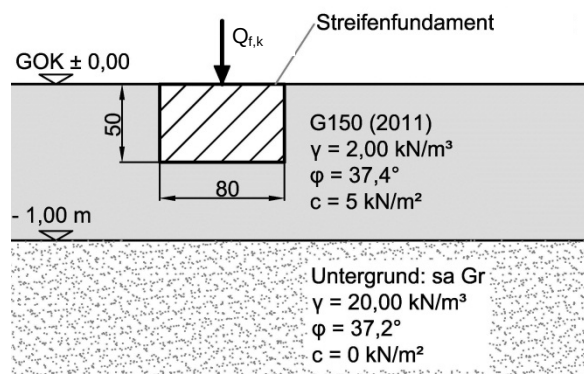


Abbildung 4-1: Angaben für die Berechnung der Grundbruchlast  $Q_{f,k}$

Für das in Abbildung 4-1 dargestellte Streifenfundament wurde exemplarisch die Grundbruchlast  $Q_{f,k}$  je 1 m Länge des Streifenfundaments unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen ermittelt.

- Es wurden die in Abbildung 4-1 angeführten Kennwerte ( $\gamma$ ,  $\phi$  und  $c$ ) des Untergrundes und der GSG-Schicht sowie die dargestellte Geometrie des Streifenfundaments verwendet.
- Es wurde eine vollständige Mobilisierung der Scherspannung innerhalb der GSG-Schicht und der daraus resultierenden Scherparameter  $\phi$  und  $c$  des Materialtyps G150 (2011) angesetzt.
- Die GSG-Schicht wurde mit der in der ÖNORM B 4435-2 angeführten Methode – „Berücksichtigung eines horizontal geschichteten Untergrundes“ – berücksichtigt, wobei die GSG-Schicht als Bodenschicht angesehen wird.

Es ergibt sich folgende charakteristische Grundbruchlast  $Q_{f;k}$  je 1 m Länge des Streifenfundaments.

$$Q_{f;k} = 348,99 \text{ kN / m} \quad (4-16)$$

Der Bemessungswert der Grundbruchlast  $Q_{f;d}$  ist der Quotient der charakteristischen Grundbruchlast  $Q_{f;k}$  und des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{R;v}$  gemäß ÖNORM B 1997-1-1.

$$Q_{f;d} = \frac{Q_{f;k}}{\gamma_{R;v}} = \frac{348,99}{1,4} = 249,27 \text{ kN / m} \quad (4-17)$$

In weiterer Folge wird der Einfluss der GSG-Schicht auf den Bemessungswert der Grundbruchlast  $Q_{f;d}$  in der Art ermittelt, dass für das in Abbildung 4-1 angeführte Streifenfundament die Grundbruchlast  $Q_{f;d,Boden}$  ohne GSG-Schicht berechnet wird, wobei die Einbindetiefe, die Breite des Fundaments und die Kennwerte des Untergrundes ( $\gamma$ ,  $\phi$  und  $c$ ) unverändert bleiben:

$$Q_{f;k,Boden} = 550,47 \text{ kN / m} \quad (4-18)$$

$$Q_{f;d,Boden} = \frac{Q_{f;k,Boden}}{\gamma_{R;v}} = \frac{550,47}{1,4} = 393,19 \text{ kN / m} \quad (4-19)$$

mit:

|                 |                                                                                    |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{f;k,Boden}$ | charakteristischer Widerstand gegen Grundbruch (Grundbruchlast) ohne GSG-Schicht   |
| $Q_{f;d,Boden}$ | Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch (Grundbruchlast) ohne GSG-Schicht |
| $\gamma_{R;v}$  | Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand – Grundbruch                             |

Das Verhältnis  $\alpha_1$  der Bemessungswerte der Grundbruchlasten von  $Q_{f;d}$  (mit GSG-Schicht) und  $Q_{f;d,Boden}$  (ohne GSG-Schicht) ergibt wie folgt:

$$\alpha_1 = \frac{Q_{f;d}}{Q_{f;d,Boden}} = \frac{249,27}{393,19} = 0,63 \quad (4-20)$$

mit:

|            |                                                                          |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_1$ | Verhältnis zwischen den Bemessungswerten $Q_{f;d,Boden}$ und $Q_{f;d}$ . |
| $Q_{f;d}$  | Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch mit einer GSG-Schicht   |

Die Reduktion der Grundbruchlast  $Q_{f;d,Boden}$  zufolge der GSG-Schicht ist in erster Linie auf die geringe Wichte von GSG zurückzuführen.

Bei der Berechnung der Grundbruchlast  $Q_{f;k}$  wurde die vollständige Mobilisierung der Scherparamater der GSG-Schicht vorausgesetzt. Die dabei auftretenden Scherdehnungen können jedoch aufgrund ihrer Größe dazu führen, dass es zu unzulässig großen Verschiebungen der Gründung kommt und somit die Sicherstellung der Tragfähigkeit des Bauwerks nicht gegeben ist.

Im folgenden Abschnitt 4.4.2 wird deshalb bei der Ermittlung der Grundbruchlast die Verformungsverträglichkeit zwischen der GSG-Schicht und der Bodenschicht berücksichtigt.

Daher treten im Vergleich zu der im Abschnitt 4.4.1 durchgeführten Grundbruchberechnung kleinere Scherdehnungen innerhalb GSG-Schicht auf.

#### 4.4.2 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – Grundbruch bei Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit zwischen GSG und Boden

Für den Nachweis der Tragfähigkeit von Flächengründungen ist folgende Gleichung einzuhalten.

$$V_d \leq Q_d \quad (4-21)$$

mit:

$V_d$  Bemessungswert der Beanspruchung

$Q_d$  Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch bei Berücksichtigung der Verformungskompatibilität zwischen GSG und Boden

Der Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch bei Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit zwischen einer GSG-Schicht und einer Bodenschicht berechnet sich wie folgt:

$$Q_d = \frac{Q_k}{\gamma_{R,v}} \quad (4-22)$$

mit:

$Q_k$  charakteristischer Widerstand gegen Grundbruch bei Berücksichtigung der Verformungskompatibilität zwischen einer GSG-Schicht und einer Bodenschicht - Grundbruchlast

$\gamma_{R,v}$  Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand – Grundbruch

Die Berechnung der Grundbruchlast  $Q_k$  von Flächengründungen unter Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit zwischen der GSG-Schicht und der Bodenschicht erfolgt nach dem Formelwerk der ÖNORM B 4435-2.

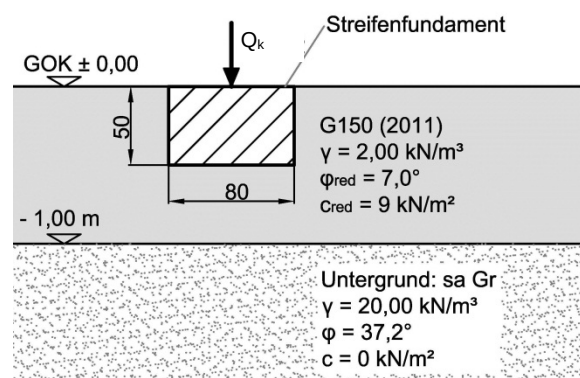


Abbildung 4-2: Beispiel für die Berechnung der Tragfähigkeit eines Streifenfundaments bei Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit zwischen der GSG-Schicht und der Bodenschicht



Für das in Abbildung 4-2 dargestellte Streifenfundament, welches sich hinsichtlich der Geometrie von jenem in Abbildung 4-1 nicht unterscheidet, wurde exemplarisch die Grundbruchlast  $Q_k$  je 1 m Länge des Streifenfundaments unter Berücksichtigung folgender Punkte berechnet.

- Es wurden die in Abbildung 4-2 angeführten Kennwerte ( $\gamma$ ,  $\phi$  und  $c$ ) des Untergrundes sowie die dargestellte Geometrie des Streifenfundaments verwendet.
- Es wurde nur eine teilweise Mobilisierung der Scherspannung innerhalb der GSG-Schicht angesetzt, weshalb im Zuge der Berechnung die reduzierten Scherparameter  $\phi_{red}$  und  $c_{red}$  des Materialtyps G150 (2011) berücksichtigt wurden.
- Die GSG-Schicht wurde mit der in der ÖNORM B 4435-2 angeführten Methode – „Berücksichtigung eines horizontal geschichteten Untergrundes“ - berücksichtigt, wobei die GSG-Schicht als zusätzliche Schicht zum Untergrund angesehen wird.

Es ergibt sich folgende charakteristische Grundbruchlast  $Q_k$  je 1 m Länge des Streifenfundaments:

$$Q_k = 107,70 \text{ kN / m} \quad (4-23)$$

Der Bemessungswert der Grundbruchlast  $Q_d$  ist Quotient der charakteristischen Grundbruchlast  $Q_k$  und des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{R;v}$ .

$$Q_d = \frac{Q_k}{\gamma_{R;v}} = \frac{107,70}{1,0} = 107,7 \text{ kN / m} \quad (4-24)$$

Die Größe des Teilsicherheitsbeiwertes von  $\gamma_{R;v} = 1,0$  wird damit begründet, dass – bedingt durch die teilweise mobilisierte Scherfestigkeit – noch (deutliche) Tragreserven (= Sicherheit) innerhalb der GSG-Schicht vorliegen.

In weiterer Folge wird der Einfluss der GSG-Schicht auf den Bemessungswert der Grundbruchlast  $Q_d$  exemplarisch ermittelt. Es wird für das in Abbildung 4-2 angeführte Streifenfundament die Grundbruchlast  $Q_{f;d,Boden}$  ohne GSG-Schicht berechnet, wobei die Einbindetiefe, die Breite des Fundaments und die Kennwerte des Untergrundes ( $\gamma$ ,  $\phi$  und  $c$ ) unverändert bleiben.

$$Q_{f;k,Boden} = 550,47 \text{ kN / m} \quad (4-25)$$

$$Q_{f;d,Boden} = \frac{Q_{f;k,Boden}}{\gamma_{R;v}} = \frac{550,47}{1,4} = 393,19 \text{ kN / m} \quad (4-26)$$

mit:

|                 |                                                                                    |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{f;k,Boden}$ | charakteristischer Widerstand gegen Grundbruch (Grundbruchlast) ohne GSG-Schicht   |
| $Q_{f;d,Boden}$ | Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch (Grundbruchlast) ohne GSG-Schicht |
| $\gamma_{R;v}$  | Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand – Grundbruch                             |

Anhand des in Abbildung 4-2 dargestellten Streifenfundaments kommt es durch die GSG-Schicht zu folgendem Verhältnis  $\alpha_2$  der Bemessungswerte der Grundbruchlasten zwischen  $Q_d$  (mit GSG-Schicht) und  $Q_{f,d,Boden}$  (ohne GSG-Schicht):

$$\alpha_2 = \frac{Q_d}{Q_{f,d,Boden}} = \frac{107,70}{393,19} = 0,27 \quad (4-27)$$

mit:

$\alpha_2$                     Verhältnis zwischen den Bemessungswerten  $Q_d$  und  $Q_{f,d,Boden}$ .

$Q_d$                     Bemessungswert des Widerstandes gegen Grundbruch mit einer GSG-Schicht

Die in Gleichung (4-28) angeführte Reduktion  $\alpha_2$  des Bemessungswertes der Grundbruchlast  $Q_{f,d,Boden}$  ist zusätzlich zur geringen Wichte von GSG auf die im Vergleich zum Boden geringe Größe der zufolge der Verformungsverträglichkeit mobilisierten Scherparameter  $\varphi_{red}$  und  $c_{red}$  des Materialtyps G150 (2011) zurückzuführen.

#### **4.4.3 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – Grundbruch** **Zusammenfassung**

Vergleicht man die Verhältniszahlen  $\alpha_1 = 0,63$  und  $\alpha_2 = 0,27$  miteinander, so führt die Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit ( $\alpha_2$ ) zwischen GSG-Schicht und Bodenschicht zu einer deutlichen Abminderung der Grundbruchlast.

Durch die Beschränkung der Scherdehnungen innerhalb der GSG-Schicht können die Verschiebungen der Gründungen auf ein zulässiges Maß reduziert werden. Daher sollte bei der Berechnung der Grundbruchlast von Gründungen auf einer GSG-Schicht die Verformungsverträglichkeit innerhalb aller der Grundbruchfigur vorliegenden Schichten berücksichtigt werden.

Inwieweit es zu einer Reduktion bzw. zu einer Erhöhung der Grundbruchlast durch die unter der Fundierung angeordneten GSG-Schicht kommt, ist von folgenden Punkten abhängig:

- Schichthöhe der GSG-Schicht
- wirksame Wichten von GSG und Boden
- Scherfestigkeit von GSG und Boden
- Mobilisierung der Scherfestigkeit von GSG und Boden

Im Einzelfall ist daher der Einfluss der GSG-Schicht auf die Grundbruchlast durch eine mechanische Grundbruchberechnung zu überprüfen, wobei folgender Punkt zu berücksichtigen ist:

- Es sind grundsätzlich immer beide Nachweise zur Ermittlung der Grundbuchlast zu führen, d.h. einerseits ohne Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit mit dem entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{R,v} > 1,0$  und andererseits mit Berücksichtigung der Verformungskompatibilität mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{R,v} = 1,0$ .

## 4.5 AP5 – Gleiten

Für die Sicherstellung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden unter Einwirkung von horizontalen Lasten ist eine entsprechende Kraftübertragung der horizontalen Lasten in den Untergrund notwendig. Da im Allgemeinen keine Adhäsion zwischen der Fundierung und dem Untergrund vorliegt, werden die horizontalen Kräfte über Reibung in der Fundamentsohle in den Untergrund abgeleitet, wobei folgende Voraussetzungen erfüllt sein müssen:

- Normalspannung in der Fundamentsohle
- Sohlreibung in der Fundamentsohle
- horizontale Verschiebung der Fundierung bzw. des Gebäudes (Mobilisierung der Reibung)

Für die Berechnung der Scherspannungen in Abhängigkeit von der Verschiebung der Fundierung ist die Kenntnis über

- die Rauigkeit der Fundamentsohle,
- die Scherfestigkeit der unter der Fundierung liegenden Schicht und
- die Mobilisierung der Scherspannung in der Fundamentsohle in Abhängigkeit von der Verschiebung

erforderlich.

Die letzten beiden Punkte der oben angeführten Aufzählung sind ausschließlich von der unter der Fundierung vorhandenen Schicht abhängig. Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojekts anhand von Versuchen im Rahmenschergerät und im Triaxialgerät die Mobilisierung der Scherspannung und die Scherfestigkeit von GSG-Schichten untersucht (s. Abschnitt 3.3.10 bis Abschnitt 3.3.12). Auf Basis der Versuchsergebnisse wird die folgende normative Vorgehensweise für die Berechnung der horizontalen Tragfähigkeit von Fundierungen auf einer GSG-Schicht (Gleitsicherheitsnachweis) beschrieben.

### 4.5.1 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit - Gleiten

Für den Fall, dass der Lastneigungswinkel  $\delta_s$  der Beanspruchung  $Q$  der Flächengründung ungleich Null ist (s. Abbildung 4-3), ist gemäß ÖNORM B 4435-2 folgender Gleitsicherheitsnachweis zu führen:

$$\frac{\tan \delta_d}{\tan \delta_s} \geq 1,0 \quad (4-28)$$

mit:

$\delta_d$  Bemessungswert des Sohlreibungswinkels

$\delta_s$  Lastneigungswinkel der Beanspruchung  $Q$  (s. Abbildung 4-3)

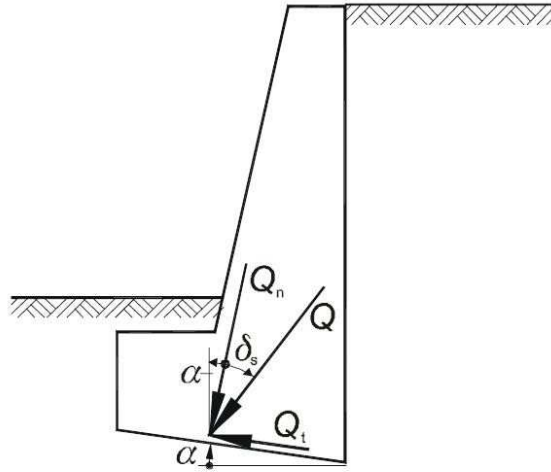


Abbildung 4-3: Definition des Lastneigungswinkels  $\delta_s$  [ÖNORM B 4435-2]

Der Bemessungswert des Sohlreibungswinkels  $\delta_d$  wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$\tan \delta_d = \frac{\tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} \quad (4-29)$$

mit:

$\delta_k$  charakteristischer Sohlreibungswinkel

$\gamma_{R,h}$  Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand – Gleiten

Der charakteristische Sohlreibungswinkel  $\delta_k$  ergibt sich wie folgt:

$$\delta_k = \varphi \text{ bei Ortgründungen} \quad (4-30)$$

$$\delta_k = \frac{2}{3} \cdot \varphi \text{ bei Sohlflächen von Betonfertigteilen} \quad (4-31)$$

mit:

$\varphi$  Reibungswinkel der unter der Gründung vorhandenen Schicht

Für die Berechnung der Gleitsicherheit von Gründungen auf einer GSG-Schicht ist somit der Reibungswinkel von GSG notwendig. Aufgrund der Ergebnisse der Scherversuche im Rahmenschergerät und im Triaxialgerät (s. Abschnitt 3.3.10 bis Abschnitt 3.3.12) kann der Reibungswinkel  $\varphi$  zufolge des Bruchs der Proben (s. Abbildung 3-72 und Abbildung 3-73) der jeweiligen Materialtypen für die Ermittlung des charakteristischen Sohlreibungswinkel  $\delta_k$  nicht verwendet werden, da für die Mobilisierung der Scherfestigkeit sehr große Verformungen auftreten, die zu unzulässig großen Verschiebungen des Fundaments führen könnten.

Stattdessen werden die Reibungswinkel  $\varphi_{red}$  zufolge einer teilweisen Mobilisierung der Scherspannung bei der Ermittlung des charakteristischen Sohlreibungswinkel  $\delta_k$  von Flächengründungen auf GSG-Schichten verwendet (s. Tabelle 4-7). Die Ermittlung dieser Reibungswinkel  $\varphi_{red}$  beruht auf der im Zuge der Triaxialversuche mobilisierten Scherspannungen der GSG-Proben bei einer vertikalen Stauchung  $\varepsilon_1 = 0,74\%$  (s. Abschnitt 3.3.12 bzw. Abbildung 4-4).

*Tabelle 4-7: Reibungswinkel  $\varphi_{red}$  zufolge der teilweisen Mobilisierung der Scherspannung*

|             |                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|             | teilweise Mobilisierung<br>Mobilisierungsgrad<br>$\varepsilon_1 = 0,74\%^{1)}$ |
| Materialtyp | $\varphi_{red} [^\circ]$                                                       |
| G150 (2011) | 7,0                                                                            |
| G210 (2012) | 12,3                                                                           |

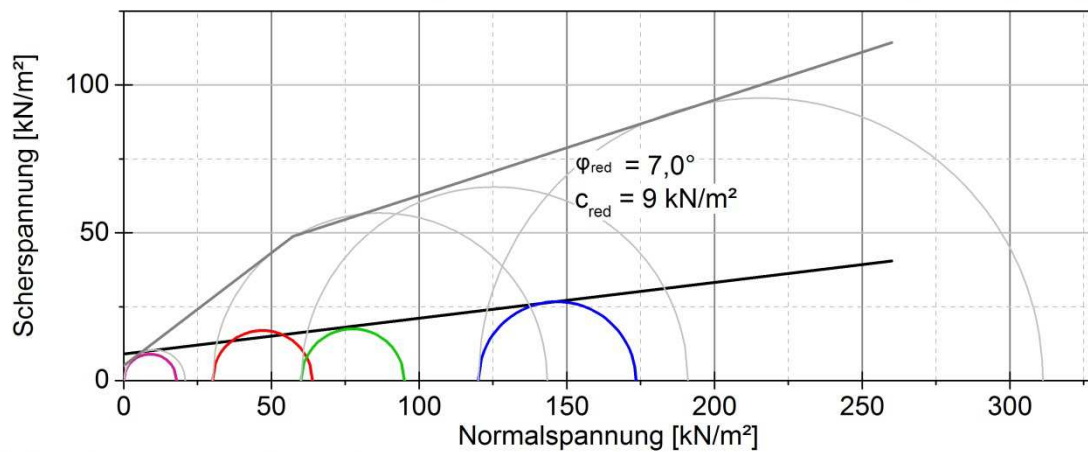
<sup>1)</sup> vertikale Stauchung der GSG-Proben im Zuge der Triaxialversuche

Somit ergibt sich der charakteristische Sohlreibungswinkel für Fundierungen auf einer GSG-Schicht  $\delta_{k,GSG}$  zu:

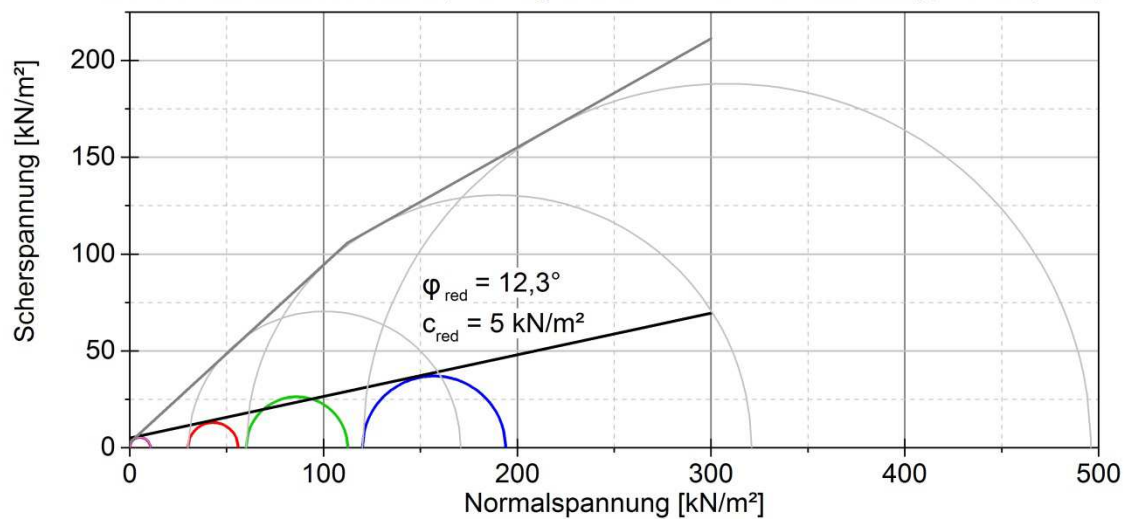
$$\delta_{k,GSG} = \varphi_{red} \text{ bei Ortbetongründungen} \quad (4-32)$$

$$\delta_{k,GSG} = \frac{2}{3} \cdot \varphi_{red} \text{ bei Sohlflächen von Betonfertigteilen} \quad (4-33)$$

teilweise mobilisierte Scherspannungen der GSG-Proben - Materialtyp G150 (2011)



teilweise mobilisierte Scherspannungen der GSG-Proben - Materialtyp G210 (2011)



— Mohr'sche Spannungskreise beim Bruch der GSG - Proben

— Bruchgerade von GSG zufolge der vollständigen Mobilisierung der Scherspannung

— Mohr'sche Spannungskreise der GSG-Proben zufolge der Berücksichtigung der  
Verformungskompatibilität mit der Bodenprobe (sa Gr)

— mobilisierte Scherfestigkeit zufolge einer Scherdehnung von  $\varepsilon_1 = 0,74\%$

Abbildung 4-4: Mobilisierte Scherspannung der Materialtypen G150 (2011) und G210 (2011) zufolge einer vertikalen Stauchung  $\varepsilon_1 = 0,74\%$  der Probekörper

Für das in Abbildung 4-5 dargestellte Streifenfundament wird folgender Gleitsicherheitsnachweis geführt.

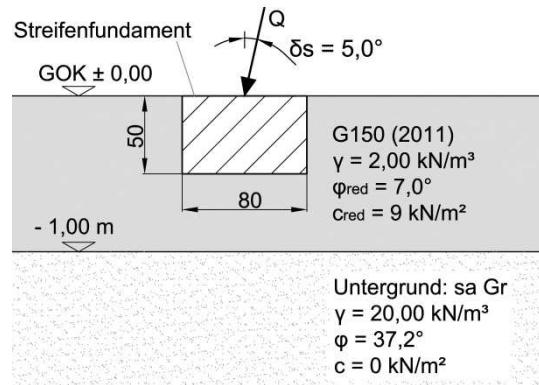


Abbildung 4-5: Angaben für die Berechnung der Gleitsicherheit eines Streifenfundaments

Der Lastneigungswinkel  $\delta_s$  der Beanspruchung  $Q$  des Streifenfundaments beträgt:

$$\delta_s = 5,0^\circ \quad (4-34)$$

Der charakteristische Sohlreibungswinkel  $\delta_{k,GSG}$  ergibt sich wie folgt:

$$\delta_{k,GSG} = \varphi_{red} = 7,0^\circ \text{ (Ortbetongründungen)} \quad (4-35)$$

Der Bemessungswert des Sohlreibungswinkels  $\delta_d$  wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$\delta_d = \arctan \frac{\tan \delta_{k,GSG}}{\gamma_{R,h}} = \arctan \frac{\tan 7,0}{1,10} = 6,4^\circ \quad (4-36)$$

mit:

$\delta_{k,GSG}$  charakteristischer Sohlreibungswinkel des Streifenfundaments auf der GSG-Schicht  
 $\gamma_{R,h}$  Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand – Gleiten

Der Sicherheitsbeiwert gegen Gleiten  $\eta_{GSG}$  des Streifenfundament auf der GSG-Schicht ergibt sich zu:

$$\eta_{GSG} = \frac{\tan \delta_d}{\tan \delta_s} = \frac{\tan 6,4}{\tan 5,0} = 1,28 \quad (4-37)$$

mit:

$\eta_{GSG}$  Gleitsicherheitsbeiwert des Streifenfundaments auf der GSG-Schicht  
 $\delta_d$  Bemessungswert des Sohlreibungswinkels  
 $\delta_s$  Lastneigungswinkel der Beanspruchung  $Q$

In weiterer Folge wird der Einfluss der GSG-Schicht auf die Gleitsicherheit exemplarisch ermittelt. Es wird für das in Abbildung 4-5 angeführte Streifenfundament die Gleitsicherheit ohne der GSG-Schicht berechnet, wobei die Kennwerte des Untergrundes ( $\gamma$ ,  $\varphi$  und  $c$ ) unverändert bleiben.

Der charakteristische Sohlreibungswinkel  $\delta_k$  ergibt sich wie folgt:

$$\delta_k = \varphi = 37,2^\circ \text{ (Ortgründungen)} \quad (4-38)$$

Der Bemessungswert des Sohlreibungswinkels  $\delta_d$  wird mit folgender Gleichung berechnet.



$$\delta_d = \arctan \frac{\tan \delta_k}{\gamma_{R,h}} = \arctan \frac{\tan 37,2}{1,10} = 34,6^\circ \quad (4-39)$$

mit:

$\delta_{k,GSG}$  charakteristischer Sohlreibungswinkel des Streifenfundaments zufolge der Bodenschicht

Der Sicherheitsbeiwert gegen Gleiten  $\eta_{Boden}$  des Streifenfundaments auf der Bodenschicht ergibt sich zu:

$$\eta_{Boden} = \frac{\tan \delta_d}{\tan \delta_s} = \frac{\tan 34,6}{\tan 5,0} = 7,89 \quad (4-40)$$

mit:

$\eta_{Boden}$  Gleitsicherheitsbeiwert des Streifenfundaments auf der Bodenschicht

Anhand des in Abbildung 4-5 dargestellten Streifenfundaments kommt es durch die GSG-Schicht zu folgendem Verhältnis  $\alpha_3$  der Gleitsicherheitsbeiwerte zwischen  $\eta_{GSG}$  (mit GSG) und  $\eta_{Boden}$  (ohne GSG):

$$\alpha_3 = \frac{\eta_{GSG}}{\eta_{Boden}} = \frac{1,28}{7,89} = 0,16 \quad (4-41)$$

mit:

$\alpha_3$  Verhältnis der Sicherheitsbeiwerte gegen Gleiten des Streifenfundaments mit und ohne GSG-Schicht

Für das in Abbildung 4-5 dargestellte Streifenfundament kommt es zu einer Reduktion des Gleitsicherheitsbeiwerts  $\eta_{GSG}$  (mit GSG) von 84% bezogen auf den Gleitsicherheitsbeiwert  $\eta_{Boden}$  (ohne GSG). Somit zeigt sich ein deutlicher Einfluss der GSG-Schicht auf den Gleitsicherheitsnachweis, welcher in erster Linie auf die Beschränkung der zulässigen Scherdehnungen innerhalb der GSG-Schicht zurückgeführt werden kann. Diese ist jedoch für die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit (und damit auch der Tragfähigkeit) von horizontal belasteten Gebäuden notwendig.

## 4.6 AP6 – Messung der Wärmeleitfähigkeit

### 4.6.1 Ziele

Das im Antrag formulierte Ziel war die Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (Wärmestromrichtung von oben nach unten) von Glasschaumgranulat bei unterschiedlichen Verdichtungsstufen (ein- bzw. zweilagig), Schichtdicken und Materialfeuchten.

Im Forschungsvorhaben sollten folgende Fragestellungen gelöst werden, welche für die Weiterentwicklung und optimale Verarbeitung von Glasschaumgranulat als Dämmstoff im Gründungsbereich eine wichtige Rolle spielen:

- Wie können die thermischen Eigenschaften des Dämmstoffs für die Nutzung im Gründungsbereich messtechnisch möglichst realitätsnah erfasst werden?

- Wie verhalten sich die Stoffeigenschaften des Glasschaumschotters in Abhängigkeit von der Verdichtung, der Schütthöhe und der Vorbelastung?
- Welchen Einfluss üben die Anfangsfeuchte und die Feuchte im eingebauten Zustand auf die Wärmeleitfähigkeit aus?
- Welche Maßnahmen hinsichtlich der Dämmstoffvorbereitung, Kompression und Verarbeitung sind zur Senkung der Wärmeleitfähigkeit förderlich?

Anmerkung 1: Es wurden jeweils die lose (= unverdichtete) Schüttung sowie die Schüttung mit zwei Verdichtungsgraden (10% und 20% bis 25%) untersucht. Die Verdichtung erfolgte jeweils einlagig.

Anmerkung 2: Der Wärmetransport in Schüttungen unter baupraktischen Einbaubedingungen setzt sich aus der Wärmeleitung über das Feststoffgerüst, das Porengas sowie den Wärmeaustausch durch lokale Strahlung zusammen. Hinzu kommen im Falle feuchter Schüttungen Wärmeleitung über das Wasser und der Wärmetransport durch Dampfdiffusion, welcher vom Benetzungsgrad der Oberflächen bestimmt wird. Für die thermische Charakterisierung der Schüttung und insbesondere für die Modellbildung ist die Kenntnis der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur erforderlich. Entsprechend wurden Messungen an trockenen Proben bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Schüttungen erfolgen Messungen in einem Folgeprojekt (FFG Projekt store4grid).

#### **4.6.2 Ein-Platten-Messapparatur**

Die Ein-Platten-Messapparatur wurde entwickelt um Wärmeleitfähigkeitsversuche an verdichtetem Glasschaumschotter vorzunehmen. Diese wurde eigens für die Messung von Schüttungen mit der Möglichkeit der Verdichtung und Wärmestromrichtung von oben nach unten (für die Anwendung der Dämmstoffe im Fundamentbereich) konstruiert. In der nachfolgenden Abbildung ist der prinzipielle Aufbau der Ein-Platten-Messapparatur dargestellt.

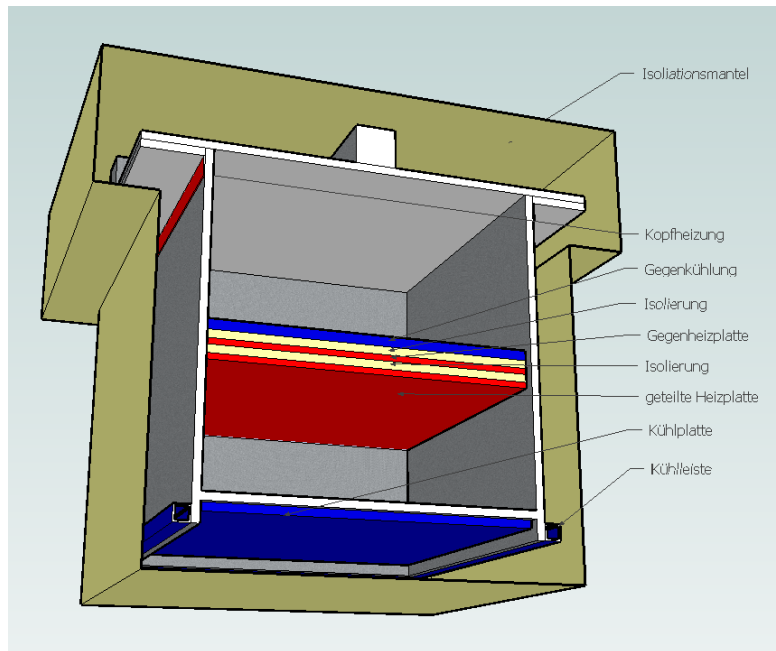


Abbildung 4-6: 3D-Ansicht der Ein-Platten-Messapparatur mit Schnitt mit thermisch aktiven Bauteilen

Ziel des zu entwickelnden Messverfahrens sollte es sein, die Wärmeleitfähigkeit von Glasschaumgranulat in Abhängigkeit von Verdichtung, Belastung sowie Feuchte ermitteln zu können. Folgende Überlegungen wurden dabei berücksichtigt:

Die bislang nach Norm bei Messungen vorgeschriebene Temperaturdifferenz von 10 K zwischen Warm- und Kaltplatte führt bei feuchten Proben zu Feuchtetransportvorgängen und letztlich zu Feuchtigkeitsgradienten im Dammstoff. Diese instationären Vorgänge können zu gravierenden Abweichung des Messwertes für die effektive Wärmeleitfähigkeit führen, weshalb - abweichend von der Norm die geplanten Messungen auch mit einer Temperaturdifferenz von nur 5 K gemessen werden sollten.

Grundsätzlich ist der aufzuprägende Wärmestrom durch Anlegen einer Differenztemperatur bei der Messung immer in Richtung des Wärmestromes im Einsatzfall zu richten, weil der Konvektionseinfluss bei der effektiven Wärmeleitfähigkeit poröser Proben bzw. Schüttungen richtungsabhängig ausfällt.

Beim Einsatz im Gründungsbereich von Gebäuden ist demnach die Warmplatte oben und entsprechend die Kaltplatte unten einzubauen. Die Messwerte gelten folglich nicht für vertikale Anordnungen (Wanddämmung) bzw. Deckendämmungen und müssen mit dieser Einschränkung angegeben werden (Anmerkung: im Rahmen des FFG Projekts store4grid wird der Einfluss der der Richtung des Wärmestroms und damit der Konvektion untersucht).

Apparativ stellt sich das Problem, dass die normalerweise eingesetzten Plattenapparaturen nicht für derart hohe Druckkräfte gebaut sind und bei der Belastung zerstört würden. Zumindest die unten angeordnete Kaltplatte musste ja bereits während der Lastaufbringung im Trog verbleiben. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der großen Schütthöhe von 28 cm

bis 50 cm, weil die handelsüblichen Plattengeräte aufgrund des Randeinflusses (horizontaler Wärmeströme) nicht für derart hohe Schichtdicken geeignet sind. Bei einer Messfläche von 250 mm x 250 mm ist beispielsweise ein Schutzrand von 125 mm Breite notwendig, um die Randeinflüsse bei einer Probendicke von 120 mm (max. 200 mm) zu kompensieren. Schütthöhen von 30 cm bis 50 cm sind damit nicht mehr zulässig.

Ein technischer Lösungsvorschlag für die neue Messanordnung, welche im Rahmen des Projekts entwickelt und umgesetzt wurde, ist in Abbildung 4-7 gezeigt.



*Abbildung 4-7: Ein-Platten-Messapparatur, Vakuumprüfung*

Es handelt sich dabei um einen Stahltrog mit den Abmessungen 800 x 800 x 800 mm<sup>3</sup>. Die Stahlwandung des Troges wird mit einer Temperaturdifferenz von Warmplatten- bis Kaltplattentemperatur beaufschlagt, womit man einen annähernd linearen Temperaturgradienten erzeugt und in weiterer Folge praktisch eine quasi adiabate Berandung erreicht. Der Boden des Troges soll dabei auf Kaltplattentemperatur möglichst gleichmäßig stationär gekühlt werden.

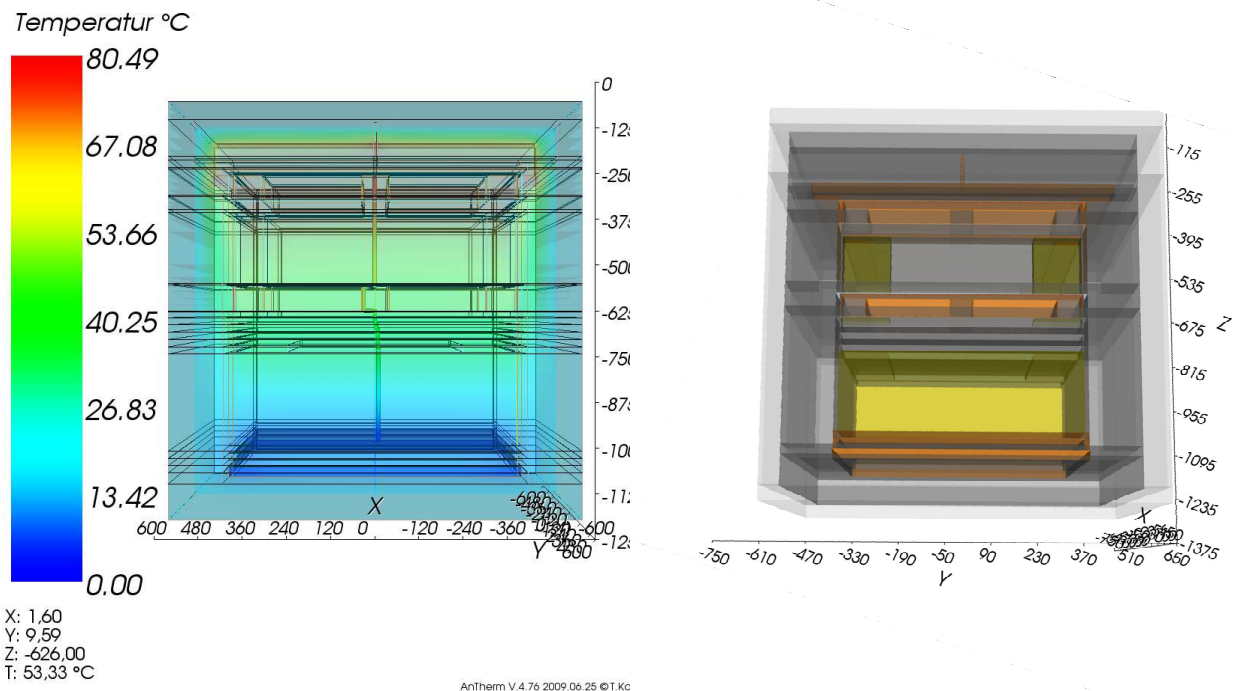


Abbildung 4-8: 3D-Fehlfarbenbild der Ein-Platten-Messapparatur, Berechnung mit Antherm

Die Heizplatte ist wie bei den standardisierten Plattengeräten mit einem Schutzrand zu versehen, allerdings wird dieser thermisch an die Trogwand angekoppelt. Die Messfläche der Heizplatte wird dann dieser Temperatur nachgeregelt, rückseitig wird entsprechend gegengeheizt, um eine quasi adiabate Randbedingung zu erreichen.

Abbildung 4-8 zeigt die numerische Simulation, welche für diese Variante als Voruntersuchung durchgeführt wurde. Aufgrund der Inhomogenität der Trogwand, welche durch die mechanische Versteifung mittels außen angebrachten Quadratrohren verursacht wird, würde der Isothermenverlauf im Randbereich gestört werden. Zur Vermeidung von Messfehlern werden die Quadratrohre daher nur zur Versteifung der Trogwände während des Verdichtungsvorganges angebracht, bei der eigentlichen thermischen Messung dann aber entfernt.

Der apparative und regelungstechnische Aufwand hierfür ist hoch und muss speziell für diesen Versuchsaufbau entwickelt, geplant und angefertigt werden. Ein weiteres Problem bei der Messung derart hoher Schichtdicken ist die jeweilige Messdauer. Diese wächst mit der Probendicke an und beträgt bei Proben von 10 cm bis 15 cm Dicke bereits schon etwa ein bis zwei Tage. Unter Berücksichtigung der Regelung stellte sich der stationäre Zustand erst nach ca. 4 bis 6 Tagen ein. Zusätzlich zur geometrischen Problematik und der Präparation des Probenkörpers kommt der Feuchteinfluss hinzu. In Abbildung 4-9 sind Fotos der Apparatur in gedämmtem Zustand zu sehen.



Abbildung 4-9: Fotos der Apparatur in gedämmtem Zustand

Der Prüfling wird im unteren Bereich wie in Abbildung 4-10 gezeigt nach Verdichtung vermessen.

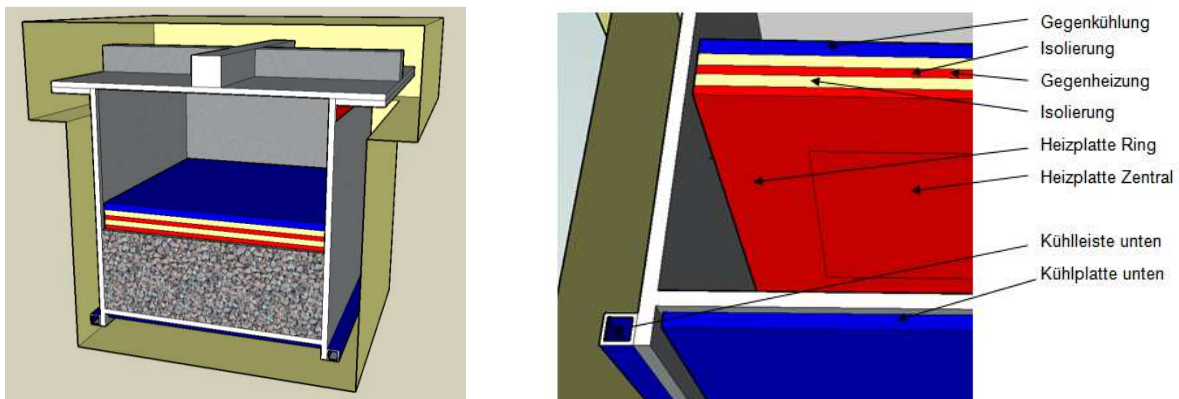


Abbildung 4-10: Schnitt der Prüfapparatur mit Schüttung (links) und Aufbau Heizung-Gegenheizung-Gegenkühlung (rechts)

Zur Messung wird mithilfe der Heizplatte zentral (siehe Abbildung 4-10, rechts) ein Wärmestrom in die Probe eingeleitet, der Heizring und die darüber liegende Gegenheizung werden mit Hilfe von Thermokettenabgleich dem zentralen Teil der Heizplatte derart nachgeregelt, dass sich zwischen Heizring und Gegenheizung kein Temperaturgradient mehr ergibt und entsprechend der gesamte Wärmestrom den Weg über die Probe nimmt. Zusätzlich wird durch die in Abbildung 4-10 dargestellte Kopfheizung ein Gradient entlang der Behälterwand aufgeprägt, sodass sich eine homogene Isothermensichtung in vertikaler Richtung ergibt.

Mit Hilfe von Thermoelementen wird die sich einstellende Temperaturdifferenz an der oberen und unteren Begrenzungsfläche der Schüttung ermittelt. Diese Thermoelemente sind in ein Alublech eingelassen, um sie vor Zerstörung bei der Verdichtung zu schützen.

Alle Versorgungsleitung im Inneren werden durch die Kopfplatte zu den Mess- und Steuergeräten geführt und mit Hilfe der Software LabView ausgewertet und geregelt.

#### 4.6.3 Methode

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit in der Ein-Platten-Apparatur erfolgt im trockenen Zustand ( $u_0 = 0 \text{ kg/m}^3$ , Trocknung im Ausheizofen) für drei verschiedene Schüttdichten, welche durch Komprimierung unter Verwendung der Hydropulsmaschine erreicht werden.

Die lose (=unverdichtete) Schüttung weist eine Dichte von etwa  $170 \text{ kg/m}^3$  auf (vgl. Abschnitt Messergebnisse). Die Einbauhöhe beträgt 30 cm. Die Komprimierung wird in zwei Stufen durchgeführt: zunächst auf 10% bezogen auf 100% der Höhe der losen Schüttung und anschließend auf 20 bis 25 bzw. 33%.

#### 4.6.4 Versuchsablauf

Die Abfolge eines Versuchs zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Glasschaumgranulat kann wie folgt beschrieben werden:

- Vorkonditionierung der Probe (Trocknung bzw. Einstellen der definierten Ausgleichsfeuchte)
- Einfüllen von Glasschaumgranulat in den Stahltrog
- Verdichten des Materials
- Durchführung der Messungen

Aufgrund der hohen thermischen Trägheit der Messappartur und der komplexen Regelung ergibt sich für die gesamte Apparatur eine recht lange Zeitkonstante, d.h. der stationäre Zustand wird erst nach ca. 4 bis 6 Tagen erreicht. Somit kann etwa ein Messpunkt pro Woche erzielt werden.

#### 4.6.5 Auswertung der Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die in die Kernheizung eingebrachte elektrische Leistung ist gleich der eingebrachten Wärmeleistung. Über die zugrundeliegende Physik kann durch Messung und Mittelung der Temperaturen bei bekannter Fläche auf die Leitfähigkeit geschlossen werden.

Der gesamte Wärmestrom durch einen ebenen Bauteil ergibt sich nach der Formel

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \quad (4-42)$$

$\dot{Q}$      Wärmestrom im stationären Zustand normal zur Probenoberfläche [J/sec = W]

$\lambda$      Wärmeleitfähigkeit eines beliebigen Materials [W/mK]

$\frac{d\vartheta}{dx}$      Temperaturgradient entlang der Dicke des Materials [K/m]



$A$  Prüffläche (der zentralen Heizplatte) [ $\text{m}^2$ ]

Durch Umstellen der obigen Gleichung und Ersetzen der Differenzialquotienten durch finite Größen ergibt sich für das Ein-Platten-Messgerät:

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot d}{\Delta\vartheta \cdot A} \quad (4-43)$$

$\Delta\vartheta$  Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen des Prüflings

$d$  Dicke des Prüflings

Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen wird aus dem Mittel der Messwerte der fünf an jeder Seite angebrachten Thermoelemente errechnet.

#### **4.6.6 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung**

Insgesamt wurden rund 60 Messungen durchgeführt, wobei ein Großteil der Messungen für die Kalibrierung und Validierung der Messapparatur verwendet wurden. Für die Optimierung der Regelung wurde zudem viel Messzeit benötigt. In sind die auswertbaren Messungen zusammengefasst (45 Messungen an 4 Proben (=Messreihe)).

Tabelle 4-8: Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung

|    |         | Verdich-<br>tung | Proben-<br>dicke | Wärmeleit-<br>fähigkeit | Probenmittel-<br>temperatur | Temperatur-<br>differenz |
|----|---------|------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|    |         | [%]              | [m]              | [W/(m K)]               | [°C]                        | [K]                      |
| 1  | Probe 0 | 33               | 0.300            | 0.099                   | 6.65                        | 11.14                    |
| 2  | Probe 0 | 33               | 0.300            | 0.097                   | 4.99                        | 8.07                     |
| 3  | Probe 1 | 0                | 0.300            | 0.083                   | 10.57                       | 9.80                     |
| 4  | Probe 1 | 10               | 0.270            | 0.084                   | 11.00                       | 10.08                    |
| 5  | Probe 1 | 25               | 0.225            | 0.078                   | 10.89                       | 10.52                    |
| 6  | Probe 1 | 25               | 0.225            | 0.080                   | 15.68                       | 10.49                    |
| 7  | Probe 1 | 25               | 0.225            | 0.082                   | 6.61                        | 8.94                     |
| 8  | Probe 1 | 25               | 0.225            | 0.081                   | 20.51                       | 10.46                    |
| 9  | Probe 2 | 0                | 0.300            | 0.100                   | 12.15                       | 13.20                    |
| 10 | Probe 2 | 0                | 0.300            | 0.099                   | 10.58                       | 10.60                    |
| 11 | Probe 2 | 0                | 0.300            | 0.107                   | 7.30                        | 10.42                    |
| 12 | Probe 2 | 0                | 0.300            | 0.102                   | 20.54                       | 11.23                    |
| 13 | Probe 2 | 10               | 0.270            | 0.090                   | 12.48                       | 13.51                    |
| 14 | Probe 2 | 10               | 0.270            | 0.095                   | 7.16                        | 10.44                    |
| 15 | Probe 2 | 10               | 0.270            | 0.098                   | 20.28                       | 10.25                    |
| 16 | Probe 2 | 10               | 0.270            | 0.094                   | 24.62                       | 9.83                     |
| 17 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.079                   | 16.00                       | 12.07                    |
| 18 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.081                   | 16.50                       | 10.81                    |
| 19 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.081                   | 16.50                       | 10.81                    |
| 20 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.079                   | 18.18                       | 12.98                    |
| 21 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.087                   | 16.22                       | 14.19                    |
| 22 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.086                   | 14.23                       | 11.43                    |
| 23 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.088                   | 18.64                       | 10.66                    |
| 24 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.091                   | 24.48                       | 10.91                    |
| 25 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.090                   | 19.62                       | 10.80                    |
| 26 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.089                   | 14.78                       | 10.71                    |
| 27 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.088                   | 13.46                       | 8.62                     |
| 28 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.089                   | 11.07                       | 5.09                     |
| 29 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.089                   | 11.07                       | 5.09                     |
| 30 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.091                   | 15.93                       | 5.13                     |
| 31 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.092                   | 20.80                       | 5.16                     |
| 32 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.093                   | 25.66                       | 5.20                     |
| 33 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.094                   | 30.53                       | 5.22                     |
| 34 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.094                   | 35.19                       | 5.19                     |
| 35 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.093                   | 24.53                       | 10.82                    |
| 36 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.092                   | 24.53                       | 10.85                    |
| 37 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.094                   | 35.21                       | 5.17                     |
| 38 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.094                   | 30.36                       | 5.18                     |
| 39 | Probe 2 | 17               | 0.250            | 0.093                   | 25.69                       | 5.19                     |
| 40 | Probe 3 | 0                | 0.300            | 0.096                   | 30.83                       | 6.03                     |
| 41 | Probe 3 | 0                | 0.300            | 0.093                   | 21.29                       | 6.11                     |
| 42 | Probe 3 | 0                | 0.300            | 0.092                   | 11.61                       | 6.01                     |
| 43 | Probe 3 | 10               | 0.270            | 0.090                   | 11.42                       | 5.62                     |
| 44 | Probe 3 | 10               | 0.270            | 0.093                   | 21.16                       | 5.69                     |
| 45 | Probe 3 | 10               | 0.270            | 0.095                   | 30.65                       | 5.74                     |
| 46 | Probe 3 | 22               | 0.235            | 0.082                   | 11.07                       | 5.03                     |
| 47 | Probe 3 | 22               | 0.235            | 0.084                   | 20.80                       | 5.03                     |
| 48 | Probe 3 | 22               | 0.235            | 0.085                   | 30.49                       | 5.18                     |

Im Folgenden werden die Daten ausgewertet. Der Wert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, \text{tr}}$  wird durch Interpolation von Messwerten der Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Temperaturen

ermittelt. In Abbildung 4-11 ist Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10tr}$  als Funktion des Verdichtungsgrades dargestellt und in Abbildung 4-12 als Funktion der Dichte.

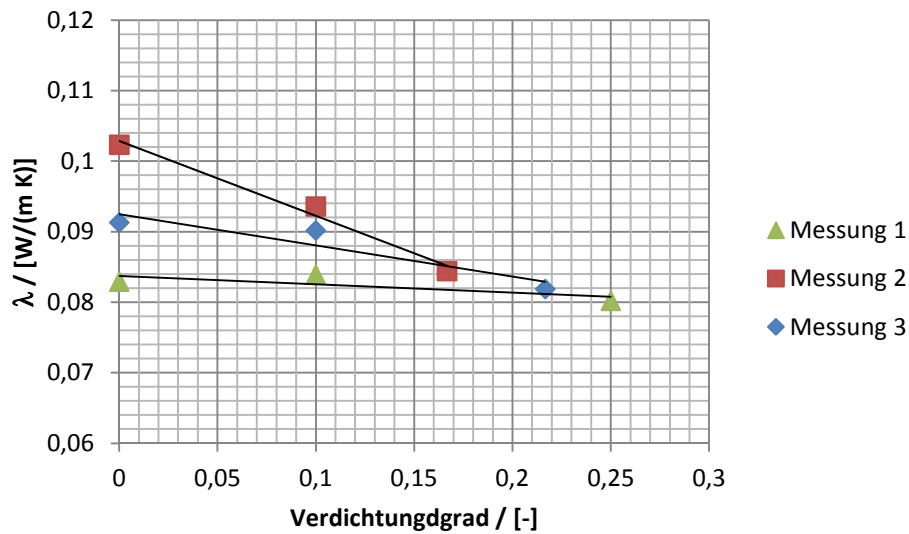


Abbildung 4-11: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10tr}$  in Abhängigkeit der Verdichtung (100 % entspricht 0.3 m Dämmstärke)

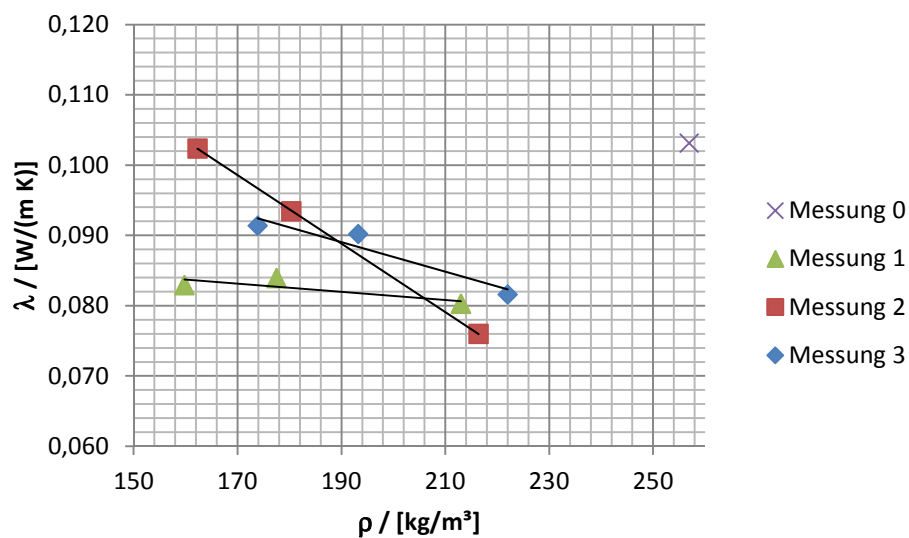


Abbildung 4-12: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10tr}$  als Funktion der Dichte (lose Schüttung sowie Verdichtung auf 10%, 25%, 22% bzw. 17%)

Abbildung 4-13 und folgende zeigt die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur.

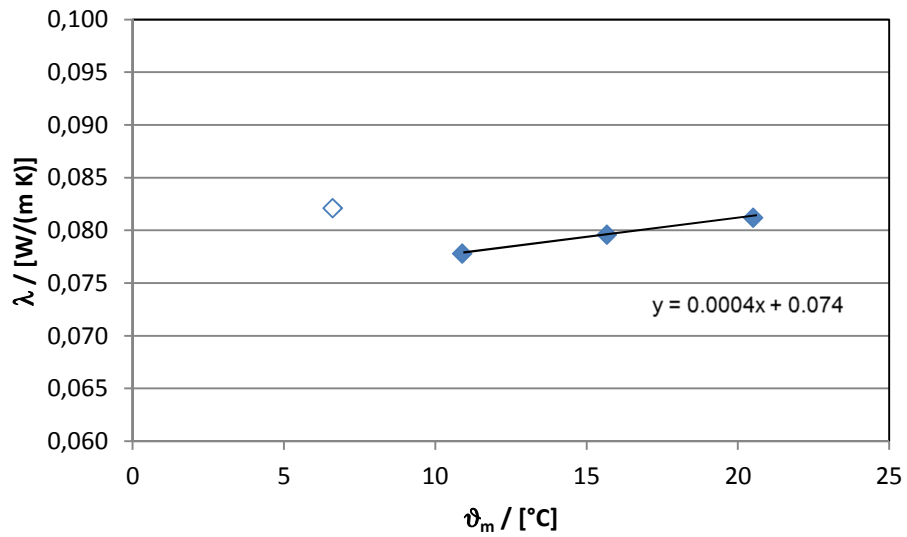


Abbildung 4-13: Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (Probe 1) Verdichtung 75%

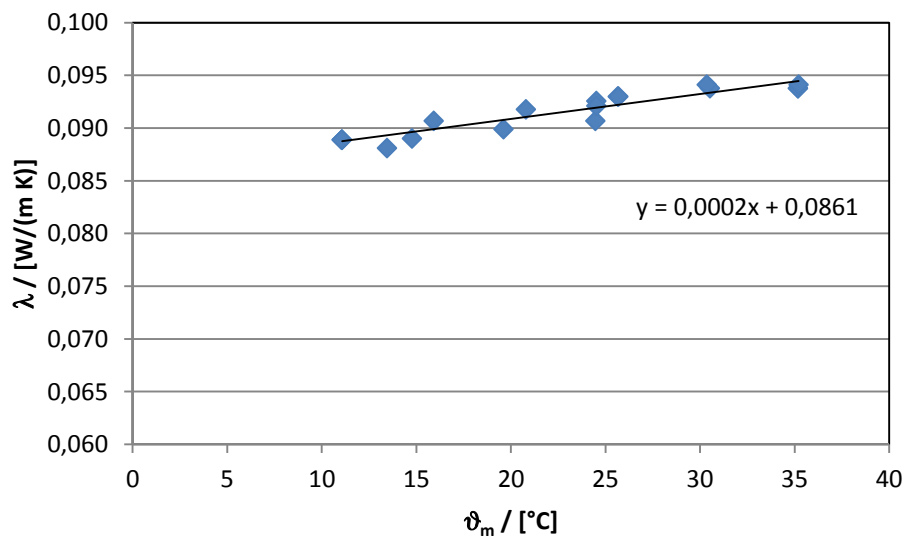


Abbildung 4-14: Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (Probe 2) Verdichtung 75%

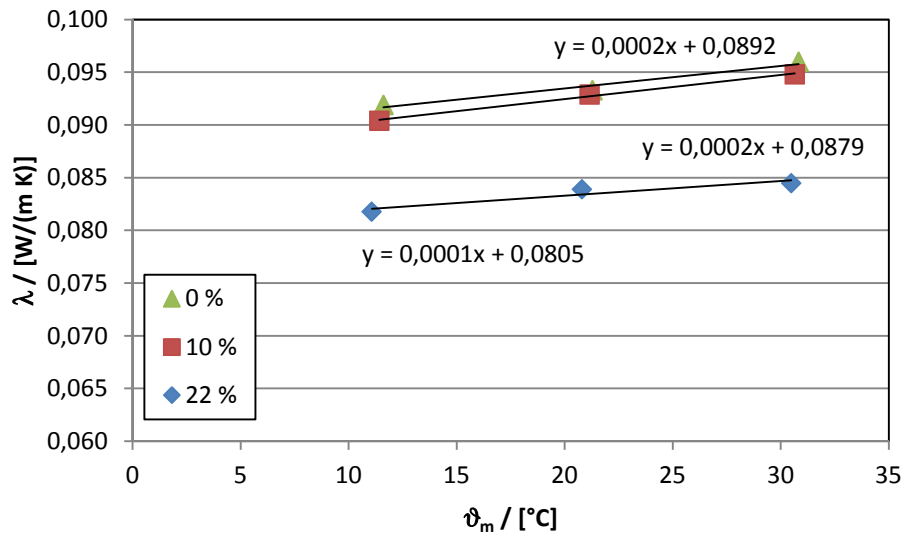


Abbildung 4-15: Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (Probe 3) Verdichtung 0 %, 10 % und 22 %

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Messungen abgeleitet werden.

- Die Wärmeleitfähigkeit streut deutlich zwischen den verschiedenen Messungen (zwischen etwa 0.10 W/(m K) und 0.08 W/(m K)).
- Es gibt einen Trend, dass die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Verdichtung abnimmt. (bei zwei von 3 Messreihen scheint es eher ein Sprung zu sein (Messung 1 und 3) bei Messung 2 lässt sich ein linearer Verlauf erkennen).
- Die Streuung nimmt mit zunehmender Verdichtung ab. Die Werte liegen dann bei etwa 0.08 W/(m K).
- Die Temperaturabhängigkeit ist eindeutig, jedoch für normale hier adressierte Einsatzbedingungen (d.h. Dämmung der Bodenplatte) nicht relevant (von Bedeutung jedoch für die Modellierung und Modellvalidierung, vgl. entsprechender Abschnitt unten).

Aus dieser Analyse der Messreihen ergeben sich folgende Fragen:

1. Was ist der physikalische Effekt für die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Verdichtung (und somit Dichte)?
2. Was führt zur starken Streuung bei der losen Schüttung (und warum ist die Streuung bei der hohen Verdichtung geringer)?

Begründung für die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Verdichtung:

Es handelt sich um eine sehr grobkörnige Schüttung, manche Hohlräume sind zusammenhängend und durchdringen die Schüttung häufig sehr weitreichend. Durch die Verdichtung rutschen die Körner in eine neue Position, die (meisten) brechen dabei nicht durch, sie reiben sich höchstens an den Spitzen etwas ab, aber das ist vernachlässigbar. Es kann also von einem Modell ausgegangen werden, das den Festkörper praktisch gleich lässt

und nur den Hohlraum beim Verdichten reduziert. Wenn dann noch davon ausgegangen wird, dass es praktische keine Konvektion gibt („Stack-effekt“ weil die Kaltplatte unten und die Warmplatte oben ist), so verbleiben also nur die Wärmeleitung in Festkörper und Luft sowie die Wärmestrahlung als Wärmetransportmechanismen. Durch die Verdichtung werden die Hohlräume kleiner, die „thermischen Kurzschlüsse“ (durch Strahlungsübertragung über längere Strecken in den Hohlräumen) weniger. Damit sinkt die Wärmeleitfähigkeit, sofern dieser Effekt die Festkörperleitung überkompensiert. Im Abschnitt Modellierung und Simulation wird der Zusammenhang (Festkörperleitung, Kontaktwiderstände und Strahlung) weiter untersucht und bestätigt.

Statistisch gesehen ist der Unterschied von Porosität, Kontakt zwischen Partikeln etc. zwischen zwei lose Schüttungen grösser, als der zwischen zwei komprimierten Schüttungen. In anderen Worten, nach der Verdichtung werden tendenziell die Schüttungen ähnlicher und homogener wodurch die Streuung der Messwerte abnimmt.

Messfehler sollten durch den Aufbau der Apparatur (aufgeprägte Gradient der Behälterwand) ausgeschlossen sein, tendenziell nimmt jedoch der Messfehler mit zunehmender Schütthöhe aufgrund der Randeffekte zu.

#### **4.6.7 Validierung**

Zusätzlich zur Messung in der neu entwickelten Ein-Platten-Apparatur wurde zur Validierung der Messwerte eine Vergleichsmessung in einer speziell dafür umgebauten Zwei-Platten-Apparatur durchgeführt. Um die Schüttung aufnehmen zu können wurden hierfür Behälterwandungen gebaut.



*Abbildung 4-16: Modifizierte 2-Platten Apparatur zur Aufnahme von Schaumglas-Granulat-Schüttungen*

Um die Messergebnisse der Ein-Platten-Apparatur bestätigen zu können wurden Messungen an unverdichteten Schüttungen mit zwei verschiedenen Einbauhöhen (20 cm und 25 cm) durchgeführt, vgl. Tabelle 4-9.

**Tabelle 4-9:** Mit der Zwei-Platten-Apparatur gemessene Wärmeleitfähigkeit von losen Schüttungen

| Messung | Probe | s / [cm] | T <sub>m</sub> / [°C] | λ / [W/(m K)] | ρ / [kg/m³] |
|---------|-------|----------|-----------------------|---------------|-------------|
| 1       | 1     | 20       | 10.99                 | 0.1088        | 142         |
| 2       |       | 20       | 15.55                 | 0.1056        | 142         |
| 3       |       | 20       | 21.54                 | 0.1040        | 142         |
| 4       | 2     | 25       | 11.20                 | 0.1242        | 154         |
| 5       |       | 25       | 21.15                 | 0.1136        | 154         |

Als Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit ergibt sich mit 0.11 W/(m K) ein relativ hoher Wert. Aufgrund der Randverluste geht ein Teil des elektrisch aufgeprägten Wärmestroms nicht durch die Probe sondern geht als Randwärmeverluste verloren. Somit ist der effektive Wärmestrom der vertikal durch die Probe fließt geringer und damit auch die zu erwartende Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus stellt die Messung mit der Zwei-Platten-Apparatur einen Mittelwert aus dem Wärmestrom nach oben und dem Wärmestrom nach unten dar. Dieser fällt aufgrund der Konvektion bei der Wärmestromrichtung nach oben größer aus. Zumindest größenordnungsmäßig können die Messungen der Ein-Platten-Apparatur damit bestätigt werden.

#### 4.6.8 Fehlerrechnung

Die Wärmeleitfähigkeit λ ergibt sich aus der Fouriergleichung

$$\dot{Q} = -A \cdot \lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \quad (4-44)$$

welche unter Annahme eines linearen Temperaturgradienten sich nach der Wärmeleitfähigkeit wie folgt auflösen lässt:

$$\lambda = -\dot{Q}/A \cdot s/d\vartheta \quad (4-45)$$

Dabei ist s die Dicke der Probe. Die Fläche wird über das Quadrat der Probenbreite d gebildet.

Der Wärmestrom ergibt sich unter Annahme einer adiabaten Randbedingung aus der elektrischen Leistung der Heizplatte und somit aus dem Produkt aus Spannung und Strom, wobei letzter als Spannung über einen Bürdenwiderstand R<sub>B</sub> gemessen wird.

$$\lambda = \frac{U \cdot U_B \cdot s}{d^2 \cdot R_B \cdot d\vartheta} \quad (4-46)$$

Für die Fehlerrechnung wird die Gleichung jeweils nach den Messgrößen abgeleitet. Der Gesamtfehler ergibt sich aus der Summe der Einzelfehler. Tabelle 3-1 gibt typische Werte der Messgrößen und deren Messunsicherheit



*Tabelle 4-10: Messgröße und Unsicherheit*

|                         |                   |               |                  |
|-------------------------|-------------------|---------------|------------------|
| Dicke der Probe         | s                 | 0.3 m         | 0.002 m          |
| Breite der Probe        | d                 | 0.5 m         | 0.0005 m         |
| Spannung der Heizplatte | U                 | 3 V           | 5 %              |
| Bürdenspannung          | $U_B$             | 0.00125 V     | 3 %              |
| Bürdenwiderstand        | $R_B$             | 0.01 $\Omega$ | 0.00001 $\Omega$ |
| Temperaturdifferenz     | $\Delta\vartheta$ | 5 K           | 0.03 K           |

Für die in *Tabelle 3-1* beispielhaft angegebenen Werte ergibt sich ein Messwert der Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0.090 \text{ W/(m K)}$ . Die Messunsicherheit summiert sich auf  $0.00456 \text{ W/(m K)}$ . Damit ergibt sich ein  $\lambda_{10,\text{tr}}$  von  $0.09 \pm 0.005 \text{ W/(m K)}$ .

#### **4.6.9 Messung feuchter Proben**

In verschiedenen Publikationen (z.B. Ochs F., 2010) zur Messung von Schüttungen unter Feuchteinfluss wird von der Problematik des Stofftransportes innerhalb der Probe während des Messvorganges geschrieben.

Vom Grundprinzip der Messung sollte eigentlich ein homogener und stationärer Wärmestrom aufgeprägt werden. Der Feuchtetransport induziert allerdings einen instationären Vorgang der den Messwert für die effektive Wärmeleitfähigkeit instationär beeinflusst. Es muss daher ein Kompromiss zwischen einer möglichst langen Messdauer zum Erreichen eines quasistationären Zustandes hinsichtlich der Wärmekapazitäten des Probenkörpers und einer möglichst kurzen Messdauer wegen der instationären Feuchtetransportvorgänge vorgenommen werden. Eine prinzipielle Lösung für diese Problematik ist bislang nicht bekannt. Durch die vakuumdichte Ausführung des Troges mit entsprechend abgedichteter Deckelplatte kann der Versuchsaufbau aber auch unter Ausschluss von Konvektion und (bei vorheriger Ausheizung des Probenkörpers) auch ohne Feuchteinfluss vermessen werden. Bei Messung unter Feuchteinfluss kann darüber hinaus der Dampfdruck im Behälter eingestellt werden.

Messungen feuchter Proben konnten im Rahmen des Projekts nicht mehr durchgeführt werden. Der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit wird im Folgenden durch Modellierung und Simulation untersucht.

### **4.7 AP7 – Messdatenauswertung, mathematische Modellbildung und Weiterentwicklung**

#### **4.7.1 Modellierung der Wärmeleitfähigkeit**

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit der Glasschaumgranulatschüttung ausgewertet. Darüber hinaus werden unterschiedliche

analytische Berechnungsmethoden verglichen und anhand der Messwerte validiert. Des Weiteren wird der Einfluss von Temperatur und Verdichtungsgrad der Schüttung auf die Wärmeleitfähigkeit untersucht. Im Abschnitt 4.7.2 folgt anschließend die Modellierung des Einflusses von Feuchte.

Abbildung 4-17 stellt die Schüttung schematisch dar. Gemäß (Ochs F., 2009) besteht die Schüttung aus porösen Glasschaumkörnern und aus Luft zwischen den Körnern (Zwischenkornvolumen). Der Feuchtegehalt wird hier als vernachlässigbar betrachtet, da die Schüttung vor der Messung getrocknet worden ist. Außerdem, wird zunächst davon ausgegangen, dass der Verdichtungsgrad keinen bedeutsamen Einfluss auf die Innenporosität der Körner hat. Unter diesen Annahmen gilt (1) das Körnervolumen bleibt annähernd konstant und (2) die gesamte Volumenänderung der Schüttung entspricht der Änderung des Zwischenkornvolumens.

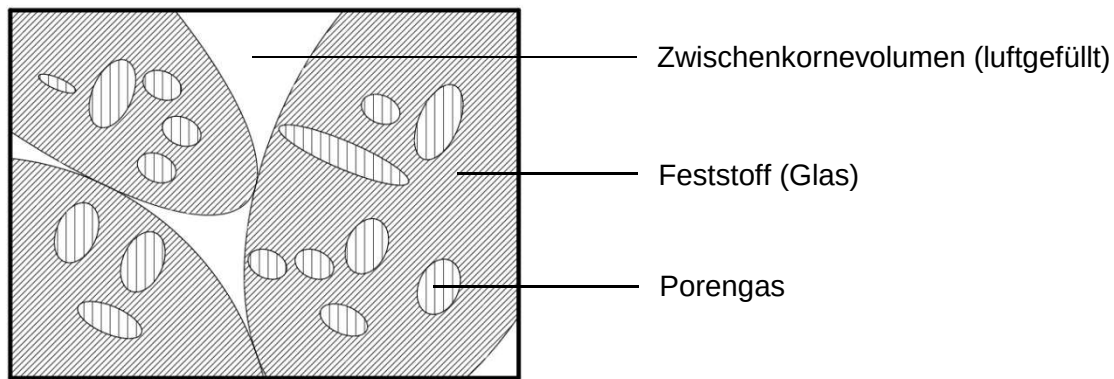


Abbildung 4-17 Schematische Darstellung der Schüttung

Die Innenporosität der Körner bleibt also auch konstant und wird durch Gleichung (4-47) beschrieben.

$$\psi_k = \frac{V_{L,k}}{V_k} \quad (4-47)$$

wobei  $V_{L,k}$  das Volumen der Porenluft und  $V_k$  das gesamte Porenvolumen ist. Die Gesamtporosität der Schüttung hängt vom Verdichtungsgrad ab und wird durch Gleichung (4-48) beschrieben.

$$\psi_{ges} = \frac{V_L}{V} \quad (4-48)$$

Dabei ist  $V_L$  das gesamten Luftvolumen der Schüttung und  $V$  das Schüttungsvolumen. Die Zwischenkörnerporosität wird durch Gleichung (4-49) definiert.

$$\psi = \frac{V_L - V_{L,k}}{V} \quad (4-49)$$

Entsprechend Abbildung 4-17, gilt die folgende Beziehung zwischen  $\psi$ ,  $\psi_{ges}$  und  $\psi_k$ .

$$\psi = \psi_{ges} - \psi_k \cdot (1 - \psi) \quad (4-50)$$

Daraus folgt:

$$\psi = \frac{\psi_{ges} - \psi_k}{1 - \psi_k} \quad (4-51)$$

Mit Gleichung (4-51) kann die Zwischenkörnerporosität  $\psi$  kann direkt aus  $\psi_{ges}$  und  $\psi_k$  berechnet werden. Die Innenporosität  $\psi_k$  ist bekannt ( $\psi_k = 0,8862$ ) und die Gesamtporosität  $\psi_{ges}$  kann durch die folgende Formel berechnet werden:

$$\psi_{ges} = 1 - \frac{m}{V} \cdot \frac{1}{\rho_g} \quad (4-52)$$

Dabei beschreibt  $m$  die Masse des Probekörpers und  $\rho_g$  die Dichte des Feststoffes (für Glas:  $\rho_g = 2460 \text{ kg/m}^3$ ).  $V$  ist das Probekörpervolumen.

In

Tabelle 4-11 sind die für die Auswertung verwendeten gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{so}$ ) aufgelistet. Es wurden insgesamt achtzehn Messungen mit drei unterschiedlichen Verdichtungsgraden durchgeführt, wobei die Probendicke zwischen 30 cm und 22.5 cm variiert. Die mittlere Temperatur der Proben wurde zwischen circa 10 °C und 35 °C variiert.

*Tabelle 4-11 Auswahl der Messdaten der Wärmeleitfähigkeit der Glasschaumgranulatschüttung für die Modellierung*

| Messung | Proben-<br>dicke | Proben-<br>dicke<br>Prozent-<br>anteil | Proben-<br>volumen | Trockene<br>Proben-<br>masse | Zwischen-<br>körner-<br>porosität | Gemesse<br>ne Mittel<br>Temperat<br>ur | Gemesse<br>ne<br>Wärmeleit-<br>fähigkeit |
|---------|------------------|----------------------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|         | h [cm]           | [%]                                    | V [m3]             | m [Kg]                       | $\psi$ [-]                        | $\vartheta_m$ [°C]                     | $\lambda$ [W/(m K)]                      |
| 1       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 11.07                                  | 0.0889                                   |
| 2       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 15.93                                  | 0.0907                                   |
| 3       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 20.80                                  | 0.0918                                   |
| 4       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 24.53                                  | 0.0921                                   |
| 5       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 24.53                                  | 0.0926                                   |
| 6       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 25.66                                  | 0.0930                                   |
| 7       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 25.69                                  | 0.0930                                   |
| 8       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 30.36                                  | 0.0941                                   |
| 9       | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 30.53                                  | 0.0941                                   |
| 10      | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 35.19                                  | 0.0938                                   |
| 11      | 25               | 16.7                                   | 0.1600             | 28.077                       | 0.373                             | 35.21                                  | 0.0941                                   |
| 12      | 27               | 10.0                                   | 0.1728             | 33.390                       | 0.420                             | 11.43                                  | 0.0905                                   |
| 14      | 27               | 10.0                                   | 0.1728             | 33.390                       | 0.420                             | 21.16                                  | 0.0930                                   |
| 15      | 27               | 10.0                                   | 0.1728             | 33.390                       | 0.420                             | 30.66                                  | 0.0947                                   |
| 16      | 30               | 0.0                                    | 0.1920             | 33.390                       | 0.477                             | 11.61                                  | 0.0919                                   |
| 17      | 30               | 0.0                                    | 0.1920             | 33.390                       | 0.477                             | 21.29                                  | 0.0932                                   |
| 18      | 30               | 0.0                                    | 0.1920             | 33.390                       | 0.477                             | 30.87                                  | 0.0947                                   |

In Abbildung 4-18 wird die gemessene Wärmeleitfähigkeit in zwei Diagrammen als Funktion der Mitteltemperatur  $\vartheta_m$  bzw. der Zwischenkörnerporosität  $\psi$  dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung mit beiden diesen Parametern

annäherungsweise linear steigt. Durch lineare Interpolation den Messwerten, kann die folgende Beziehung hergeleitet werden:

$$\lambda_{so} = 0.0002558 \cdot \vartheta_m + 0.0295 \cdot \psi + 0.075 \quad (4-53)$$

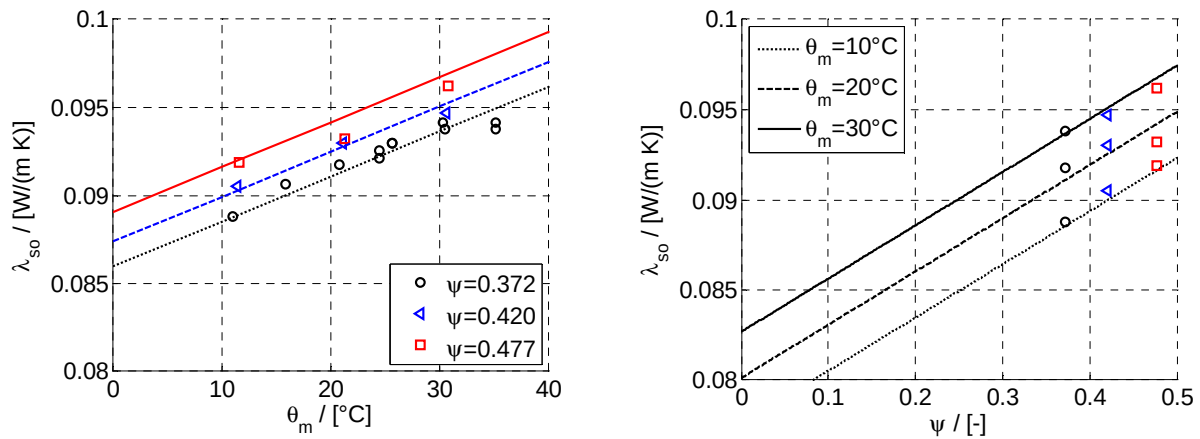


Abbildung 4-18: Linear Interpolation der Messdaten gemäß Gleichung (4-53). Links: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion der mittleren Temperatur bei unterschiedlicher Zwischenkörnerporosität  $\psi$ . Rechts: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion der Zwischenkörnerporosität bei unterschiedlicher Mitteltemperatur  $\vartheta_m$ .

In der Literatur (VDI Wärmeatlas, (Ochs 2010) stehen semi-empirische Modellen zur Verfügung, die die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit einer Schüttung aus bekannten Materialparametern ermöglichen. Solche Modelle sind allgemeiner anwendbar als Gleichung (4-53) und ermöglichen ein besseres Verständnis der Wärmetransportmechanismen, die Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung haben. Im Folgenden werden das Modell von Krischer (Krischer, 1963) und das Modell von Zehner/Schlünder (Zehner & Schlünder, 1970) beschrieben.

#### 4.7.1.1 Modell der Wärmeleitfähigkeit nach Krischer

Das von Krischer vorgeschlagene Modell betrachtet das poröse Material als zum Wärmefluss parallel und senkrecht angeordnete Luft- bzw. Feststoffschichten (Abbildung 4-19). Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Schüttung kann also nach Gleichung (4-54) gerechnet werden.

$$\lambda_{so} = \frac{1}{\frac{1-a}{\lambda_I} + \frac{a}{\lambda_{II}}} \quad (4-54)$$

Dabei ist  $a$  ein empirisch zu bestimmenden Parameter, der den Volumenanteil den zum Wärmefluss senkrecht angeordneten Schichten bezeichnet.  $\lambda_I$  und  $\lambda_{II}$  bezeichnen die Wärmeleitfähigkeiten, der zum Wärmefluss parallel bzw. senkrecht angeordneten Schichten und können nach Gleichung (4-55) bzw. (4-56) berechnet werden.

$$\lambda_I = \psi \cdot \lambda_L + (1 - \psi) \cdot \lambda_k \quad (4-55)$$

$$\lambda_{II} = \frac{1}{\frac{\psi}{\lambda_L} + \frac{1 - \psi}{\lambda_k}} \quad (4-56)$$

Hier ist  $\lambda_k$  ist die Körnerwärmeleitfähigkeit und  $\lambda_L$  bezeichnet die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der aus Luft gefüllten Zwischenkörnerräumen. Diese wird als Summe der durch Wärmeleitung ( $\lambda_{L,WL}$ ) und durch Wärmestrahlung ( $\lambda_{L,STR}$ ) gegebene Beiträge mit Gleichung (4-57) beschrieben:

$$\lambda_L = \lambda_{L,WL} + \lambda_{L,STR} \quad (4-57)$$

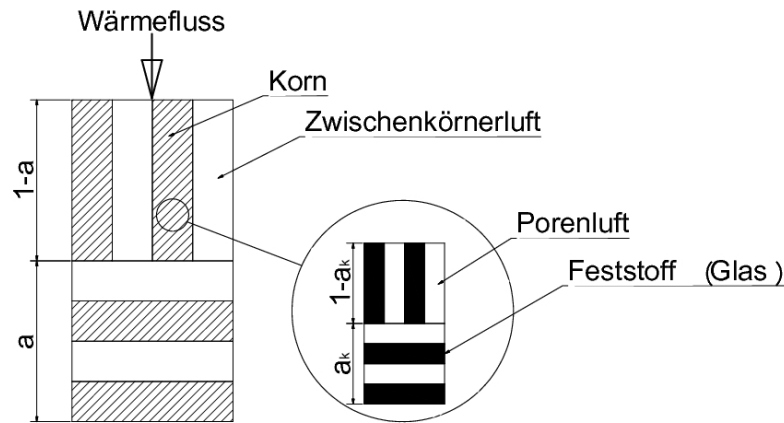


Abbildung 4-19: Grafische Darstellung des Modells für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poriger Stoffe nach Krischer (Krischer, 1963) auf der Schüttungsmaßstab (links) und auf der Körnermaßstab (rechts)

Für die Berechnung wird  $\lambda_{L,WL}=0.024$  [W/(m K)] angenommen. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für den Strahlungsaustausch kann annäherungsweise, gemäß (Tsotsas, 2012), durch die folgende Beziehung berechnet werden:

$$\lambda_{L,STR} = \frac{4\sigma \cdot d}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} \cdot T^3 \quad (4-58)$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $\varepsilon$  den Emissionskoeffizienten der Partikeloberfläche,  $\sigma$  den Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers ( $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>))] und T die Temperatur in [K]. d ist der mittleren Körnerdurchmesser der Schüttung in [m]. Da in der Regel  $\varepsilon$  und d nicht bekannt sind, wird der Parameter  $C_s$  eingeführt, dessen Wert empirisch zu ermitteln ist.

$$C_s = \frac{4\sigma \cdot d}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} \quad (4-59)$$

Gleichung (4-58) kann also folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$\lambda_{L,STR} = C_s \cdot T^3 \quad (4-60)$$

Die Körnerwärmeleitfähigkeit  $\lambda_k$  kann mit dem Krischer-Modell auf der Körnermaßstab berechnet werden (siehe Abbildung 4-17, rechts), wobei die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes bekannt ist ( $\lambda_{\text{glas}}=1.8 \text{ W/(m K)}$ ).

Die Werte von  $C_s$ , sowie die des Parameters  $a$  auf dem Körnermaßstab bzw. auf dem Schüttungsmaßstab werden durch Interpolation (best fit) von Gleichung (4-54) mit den Messwerten bestimmt und sind in Tabelle 4-12 aufgelistet. In Abbildung 4-24 sind der Verlauf von  $C_s$  gemäß Gleichung (4-59), sowie die empirisch ermittelten Werten dargestellt.

*Tabelle 4-12 Empirisch bestimmten Parametern für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach Krischer*

|                   | $C_s \text{ [W/(m K4)]}$ | $a \text{ [-]}$ |
|-------------------|--------------------------|-----------------|
| Körnermaßstab     | $0.1 \times 10^{-9}$     | 0.19            |
| Schüttungsmaßstab | $0.35 \times 10^{-8}$    | 0.8             |

#### 4.7.1.2 Modell der Wärmeleitfähigkeit nach Zehner und Schlünder

Das zweite Modell, das hier betrachtet wird, ist das Zehner/SchlünderModell (Zehner & Schlünder, 1970). Dieses ZBS-Modell bietet im Vergleich zum Modell nach Krischer den Vorteil, dass damit die Form der Körner berücksichtigt werden kann. In Abbildung 4-20 wird das Zellenmodell nach Zehner/Schlünder dargestellt.

In diesem Modell wird die Form der Körner durch Gleichung (4-61) als Funktion der Koordinaten  $z$  und  $r$  definiert:

$$r^2 + \frac{z^2}{[B + (B - 1) \cdot z]^2} = 1 \quad (4-61)$$

wobei der Parameter  $B$  von der Form des Korns und von der Zwischenkörnerporosität  $\psi$  abhängt. Er kann annäherungsweise mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$B = C \cdot \left( \frac{1 - \psi}{\psi} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (4-62)$$

$C$  ist ein empirisch zu bestimmenden Parameter. Der Einfluss des Parameters  $B$  auf die Modellgeometrie ist in Abbildung 4-20 zu erkennen (Vergleich linke und rechte Seite). Die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung (ohne Berücksichtigung des Strahlungsaustausches) kann also entsprechend nach dem Zellenmodell durch die folgende Gleichung berechnet werden:

$$\lambda_{SO} = (1 - A) \cdot \lambda_{L,WL} + A \cdot \lambda'_{SO} \quad (4-63)$$

Hierin ist  $\lambda'_{so}$  die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Kerns,  $A$  ist der Flächenanteil des Kerns und  $\lambda_{L,WL}$  ist die Wärmeleitfähigkeit des den Kern einhüllenden Ringes (der hier aus Luft besteht). Der Flächenanteil  $A$  wird als Funktion der Porosität durch Gleichung (4-64) gegeben:

$$A = \sqrt{1 - \psi} \quad (4-64)$$

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Kerns kann unter der Annahme von parallelen Wärmestromlinien analytisch berechnet werden und ist durch Gleichung (4-65) gegeben.

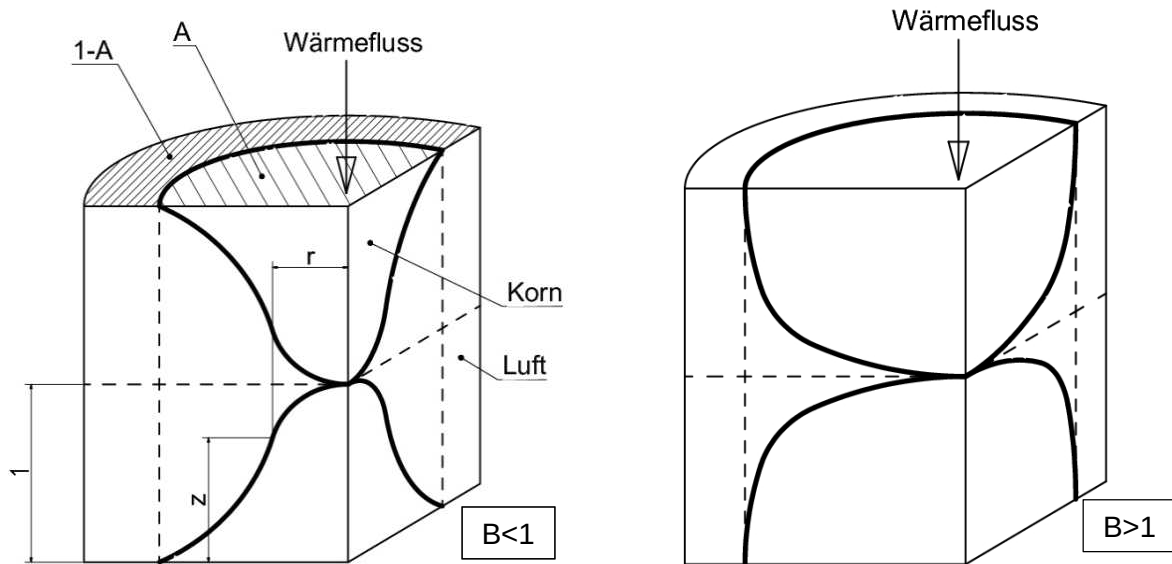


Abbildung 4-20 Zellenmodell nach (Zehner & Schlünder, 1970)

$$\lambda'_{so} = \frac{2}{1 - \frac{\lambda_{L,WL}}{\lambda_k} B} \cdot \left[ \frac{\left(1 - \frac{\lambda_{L,WL}}{\lambda_k}\right) B}{\left(1 - \frac{\lambda_{L,WL}}{\lambda_k} B\right)^2} \cdot \ln \left( \frac{\lambda_k}{B \cdot \lambda_{L,WL}} \right) - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{1 - \frac{\lambda_{L,WL}}{\lambda_k} B} \right] \cdot \lambda_{L,WL} \quad (4-65)$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Körner  $\lambda_k$  kann wieder mit dem Krischer-Modell (s.o.) berechnet werden, wie in Abbildung 4-21 dargestellt wird.



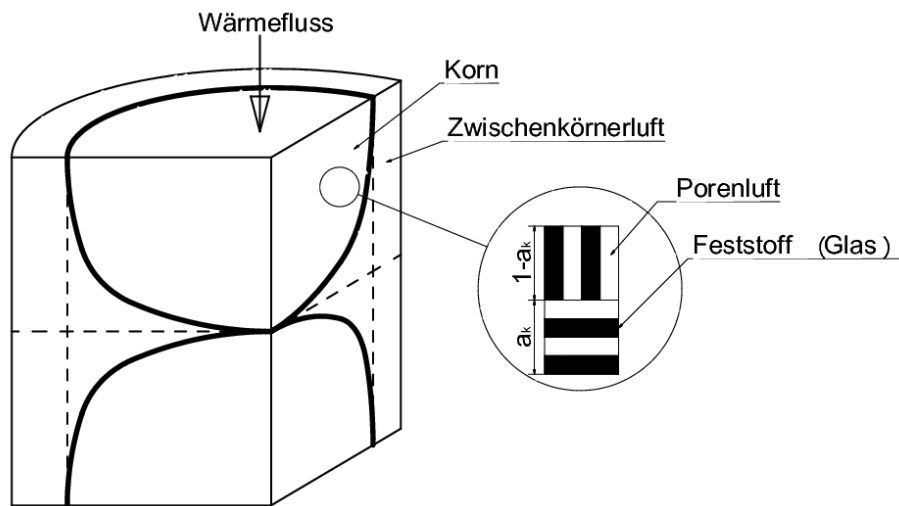


Abbildung 4-21 Gemischtes Modell (Schüttungsmaßstab: Zehner/Schlünder; Körnermaßstab: Krischer)

Der Strahlungsaustausch zwischen den Körnern kann durch Gleichung (4-66) berücksichtigt werden:

$$\lambda_{SO} = (\lambda_{SO})_{T=0} + (1 - A) \cdot \lambda_{L,STR} + \frac{A}{\frac{1}{\lambda_{L,STR}} + \frac{1}{\lambda_k}} \quad (4-66)$$

wobei der Term  $(\lambda_{SO})_{T=0}$  die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung ohne Strahlungsaustausch bezeichnet, die durch Gleichung (4-63) berechnet werden kann.  $\lambda_{L,STR}$  kann wieder mit der Gleichung (4-58) bzw. mit Gleichung (4-60) berechnet werden.

In Tabelle 4-13 sind die Parameter aufgelistet, die durch Interpolation von Gleichung (4-66) mit den Messwerten bestimmt worden sind. Die Werten von  $C_s$  als Funktion des Körnerdurchmessers sind wieder in Abbildung 4-24 dargestellt.

Tabelle 4-13 Empirisch bestimmte Parameter für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach Zehner/Schlünder

|                   | $C_s [W/(m K^4)]$     | $a [-]$ | $C [-]$ |
|-------------------|-----------------------|---------|---------|
| Körnermaßstab     | $0.4 \times 10^{-10}$ | -       | 2       |
| Schüttungsmaßstab | $0.32 \times 10^{-8}$ | 0.2     | -       |

#### 4.7.1.3 Kalibrierung der Berechnungsmodellen durch Messwerteninterpolation

In Abbildung 4-22 wurden die Messdaten mit dem Krischer Modell (Gleichung (4-54)) interpoliert.

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass das Krischer-Modell die Tendenz der Messwerte gut abbilden kann. Allerdings bestehen deutliche Abweichungen, besonders bei höheren Werten von  $\psi$ .

Die Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Schüttung mit der Temperatur und mit der Zwischenkörnerporosität kann in beiden Fällen mit Rücksicht auf dem erhöhten Wärmetransport durch Strahlungsaustausch erklärt werden. Die Auswirkungen von diesen zwei Parametern auf der Wärmeleitfähigkeit der Schüttung werden in Folgendem separat analysiert.

Der Einfluss der Temperatur auf dem Wärmetransport durch Strahlung kann eindeutig durch Gleichung (4-58) bzw. Gleichung (4-60) erklärt werden. Daraus resultiert dass die äquivalente Wärmeleitfähigkeit in dem Zwischenkörnervolumen (Gleichung (4-57)) bei steigender Temperatur zunimmt. In folgen dessen, nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit der gesamte Schüttung zu.

Die von der Schüttungswärmeleitfähigkeit aufgewiesene Tendenz, mit steigender Zwischenkörnerporosität zuzunehmen, ist nur erklärbar, wenn die äquivalente Wärmeleitfähigkeit in dem Zwischenkörnervolumen  $\lambda_L$  (Gleichung (4-57)) grösser ist als die Wärmeleitfähigkeit des Körners  $\lambda_k$ . Diese Tatsache ist wieder zu dem Wärmetransport durch Wärmestrahlung zurückzuführen. Die Wärmeleitung der Zwischenkörnerluft spielt hier nur eine untergeordnete Rolle wägend die Wärmeübertragung durch Konvektion ist vernachlässigbar, da der Wärmefluss von oben nach unten gerichtet ist.

Durch Interpolation mit den Messdaten werden die Werte für die Strahlungskoeffizienten  $C_s$  auf dem Schüttungsmaßstab und auf dem Körnermaßstab bestimmt (siehe Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13). Die werte von  $C_s$  liegen in realistischer Bereich (Abbildung 4-24).

Kaum bessere Übereinstimmung mit den Messdaten zeigt das Zehner/Schlünder Modell (Gleichung (4-66)). Die Ergebnisse sind In Abbildung 4-23 dargestellt. Die Tendenz der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Zwischenkörnerporosität und mit höherer Temperatur anzusteigen kann auch mit diesem Modell nachgebildet werden.

Um die beiden Modellen besser beurteilen zu können, würden Messwerte bei niedrigeren Porositäten  $\psi$  benötigen, welche aber nicht praxisrelevant sind.

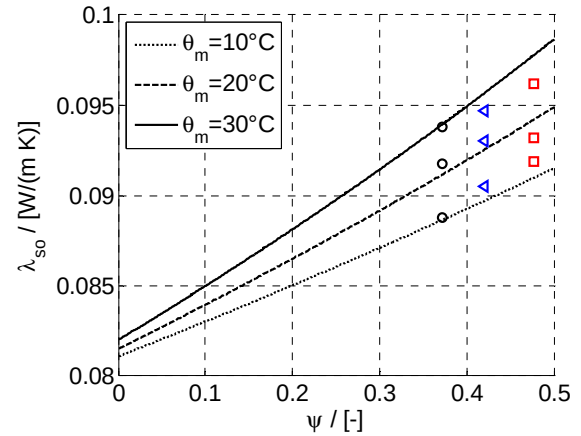
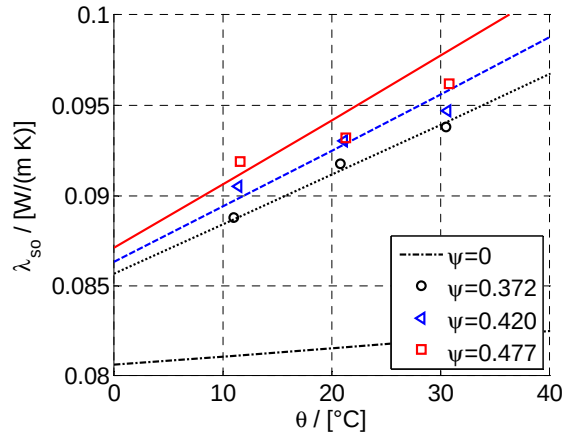


Abbildung 4-22 Interpolation der Messdaten durch Gleichung (4-54) (Krischer-Modell). Links: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion der mittleren Temperatur unterschiedlicher Zwischenkörnerporosität  $\psi$ . Rechts: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion der Zwischenkörnerporosität bei unterschiedlicher Mitteltemperatur  $\theta_m$ .

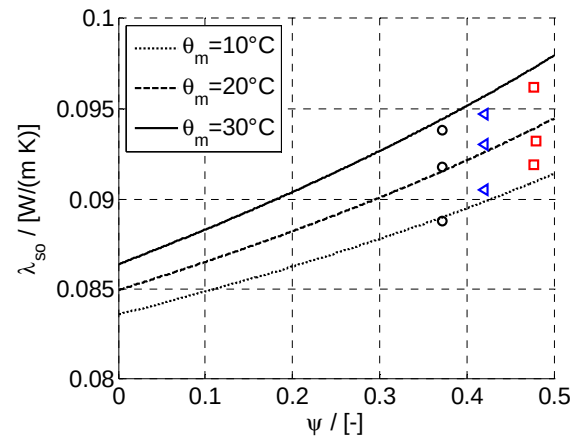
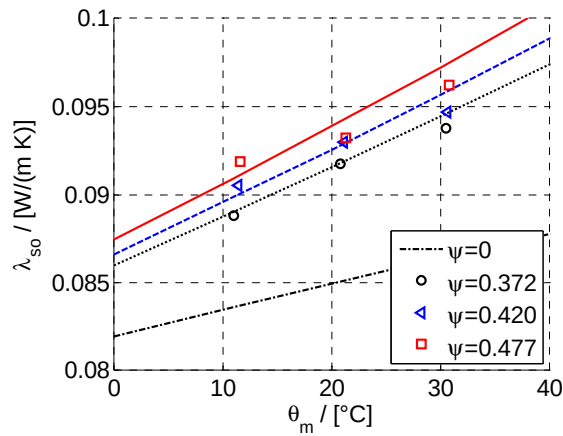


Abbildung 4-23 Interpolation der Messdaten durch Gleichung (4-66) (Zehner/Schlünder-Modell). Links: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion der mittleren Temperatur unterschiedlicher Zwischenkörnerporosität  $\psi$ . Rechts: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion der Zwischenkörnerporosität bei unterschiedlicher Mitteltemperatur  $\theta_m$ .

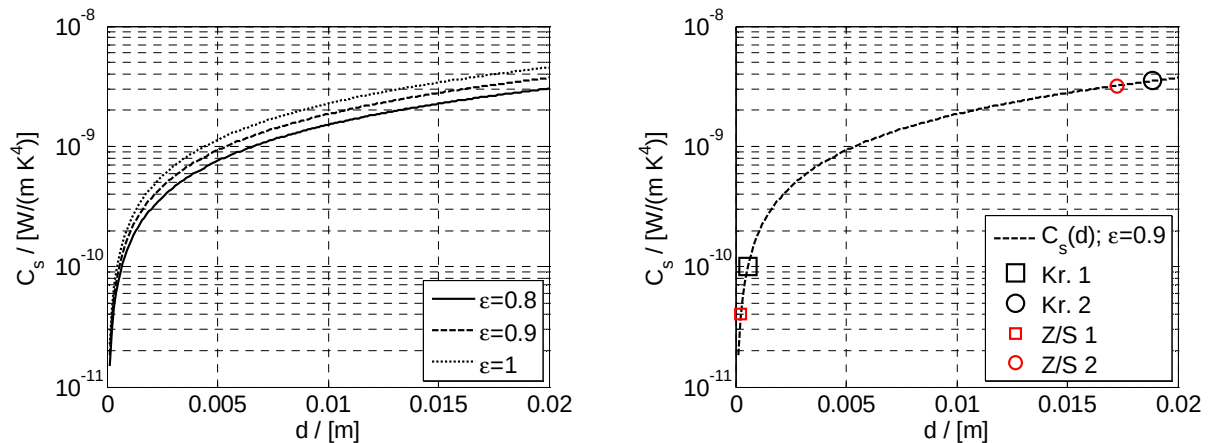


Abbildung 4-24 Links: Parameter  $C_s$  gemäß Gleichung (4-59) berechnet für unterschiedlichen wehrte von  $\epsilon$ . Rechts:  $C_s$ -Werte auf dem Einzelkórnermaßstab (1) und auf dem Schüttungsmaßstab (2) ermittelt durch Interpolation des Krischer-Modells und des ZBS-Modells mit den Messdaten ( $\epsilon=0.9$ ).

#### 4.7.2 Modellierung des Einflusses von Feuchte

„Ist ein Stoff feucht, so dass er außer Feststoff und Flüssigkeit noch Luft in den Poren enthält, so kommen grundsätzlich vier Möglichkeiten der Wärmeübertragung in Betracht:

1. Im Feststoff ( $\lambda_s$ )
2. In der Flüssigkeit ( $\lambda_w$ )
3. Im Dampf-Luftgemisch, das von benetzten Porenwänden umschlossen ist, so dass Verdampfung und Kondensation auftritt ( $\lambda_L + \lambda_{\text{diff}}$ )
4. Im Dampf-Luftgemisch, das von trockenen Porenwänden begrenzt ist, so dass keine Verdampfung und Kondensation auftritt ( $\lambda_L$ ).

(Krischer, 1963)“.

Sind im Material geschlossene, für Wasser unzugängliche, Poren vorhanden, die mit einem gas anders als Luft gefüllt sind, so kommt auch die Wärmeübertragung durch diesen Füllungsgas im Betracht ( $\lambda_{p,cl}$ ) (Ochs, 2009).

Dementsprechend kann zur Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von feuchten, porösen Stoffen das erweitertes Krischer-Model gemäß Abbildung 4-25 verwendet werden.

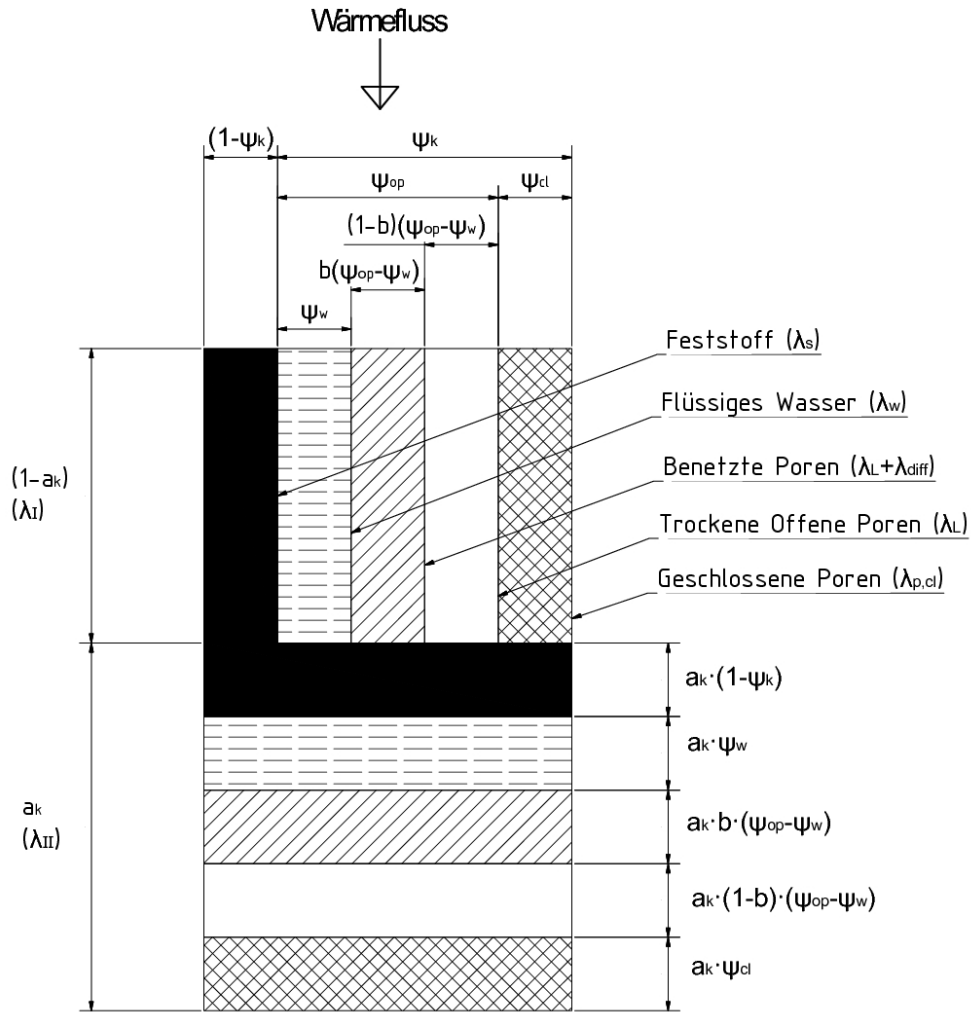


Abbildung 4-25: Erweitertes Schichtenmodell zur Berücksichtigung des Feuchtigkeitseinflusses (Ochs, 2009). Diese Darstellung bezieht sich auf den Körnermaßstab (Index "k") kann aber auch auf der Schüttungsmaßstab angewendet werden.

Die Wärmeleitfähigkeit der Körner kann durch Gleichung (4-67) berechnet werden:

$$\lambda_k = \frac{1}{\frac{1-a_k}{\lambda_I} + \frac{a_k}{\lambda_{II}}} \quad (4-67)$$

$\lambda_I$  und  $\lambda_{II}$  werden entsprechend Abbildung 4-25 durch Gleichung (4-68) bzw. durch Gleichung (4-69) gegeben:

$$\lambda_I = (1 - \psi_k)\lambda_s + \psi_w\lambda_w + b(\psi_{op} - \psi_w)\lambda_{op} + (1 - b)(\psi_{op} - \psi_w)\lambda_L + \psi_{cl}\lambda_{p,cl} \quad (4-68)$$

$$\lambda_{II} = \frac{1}{\frac{1 - \psi_k}{\lambda_s} + \frac{\psi_w}{\lambda_w} + \frac{b(\psi_{op} - \psi_w)}{\lambda_{op}} + \frac{(1 - b)(\psi_{op} - \psi_w)}{\lambda_L} + \frac{\psi_{cl}}{\lambda_{p,cl}}} \quad (4-69)$$

Dabei ist  $\psi_w$  der von flüssigem Wasser gefüllte Volumenanteil;  $\psi_{op}$  ist der Volumenanteil der offenen, von Wasser zugänglichen, Poren;  $\psi_{cl}$  ist der Volumenanteil der geschlossenen Poren. Es wird im Folgenden ein Wert von  $\psi_{cl} = 0,13$  angenommen (Messungen TU Wien).

Das Parameter  $b$  bezeichnet den Anteil des Luftvolumens in den von feuchten Porenwänden begrenzten Poren zum gesamten offenen Luftvolumen.

Für die folgende Betrachtung wird angenommen dass das in geschlossenen Poren enthaltene Gas Luft ist (daraus folgt:  $\lambda_{p,cl} = \lambda_L$ ). In den mit benetzten Wänden umschlossenen Poren tritt neben Wärmeleitung und Wärmestrahlung auch den aufgrund der Wasserdampfdiffusion Energieaustausch auf. An den wärmeren Stellen der Porenwand erfolgt eine Verdampfung, an den kälteren Stellen Kondensation. Demzufolge kann  $\lambda_{op}$  durch Gleichung (4-70) beschrieben werden:

$$\lambda_{op} = \lambda_L + \lambda_{diff} \quad (4-70)$$

$\lambda_L$  einschließt Wärmeleitung und Strahlung und kann wieder durch Gleichung (4-57) berechnet werden während der aufgrund von Dampfdiffusion auftretende Energieaustausch kann nach Krischer durch die folgende Gleichung berechnet werden:

$$\lambda_{diff} = \frac{D_v}{R_v T} \cdot \frac{p}{p - p_s} \cdot \frac{dp_s}{d\vartheta} \cdot \Delta h_v \quad (4-71)$$

$D_v$  ist der Wasserdampfdiffusionskoeffizient in Luft in  $[m^2/s]$ ;  $R_v$  ist die spezifische Gaskonstante des Wasserdampfes ( $R_v = 462 [J/(Kg \cdot K)]$ );  $T$  ist die Temperatur in  $[K]$ ;  $p$  ist der Gesamtdruck in  $[Pa]$ ;  $p_s$  ist der Sättigungsdruck des Wasserdampfes in  $[Pa]$  und  $\Delta h_v$  ist die Verdampfungswärme in  $[J/Kg]$ .

Der Wasserdampfdiffusionskoeffizient in Luft kann durch die von Krischer vorgeschlagene Gleichung berechnet werden:

$$D_v = 0,086 \left( \frac{T}{273} \right)^{2,3} \frac{10000}{p} \quad (4-72)$$

Alternativ zu Gleichung (4-72), für die Berechnung von  $\lambda_{diff}$ , kann die in dem VDI Wärmeatlas ("VDI-Wärmeatlas," 2002) vorgeschlagene Gleichung (4-73) eingesetzt werden:

$$\lambda_{diff} = \frac{D_v}{R_v^2 T^2} \cdot \frac{p_{amb}}{p_{amb} - p_s} \cdot (\Delta h_v)^2 \quad (4-73)$$

Zudem, wurde ein weiteres Model (Gleichung (4-74)) von De Vries vorgeschlagen (De Vries, 1966):

$$\lambda_{diff} = D_v \cdot \frac{dp_s}{d\vartheta} \cdot \Delta h_v \quad (4-74)$$

Die mit diesen drei Modellen berechneten Ergebnisse sind in Abbildung 4-26 als Funktion der Temperatur grafisch dargestellt. Es ist anzumerken dass, für Temperaturen unter 40°C, alle die Modelle annäherungsweise äquivalente Ergebnisse liefern.

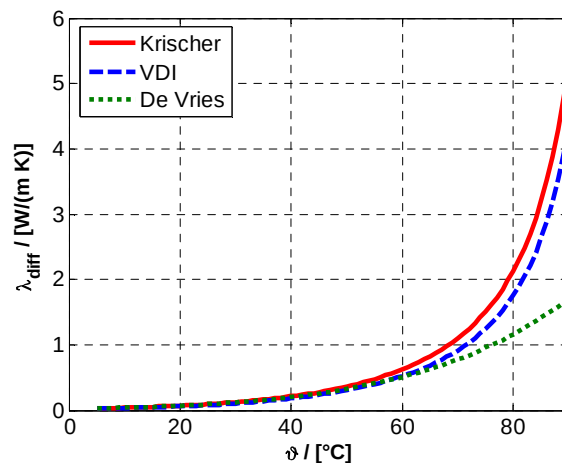


Abbildung 4-26 Effektive Wärmeleitfähigkeit aufgrund von Dampfdiffusion als Funktion der Temperatur nach Krischer, VDI Wärmeatlas und De Vries. Abbildung von (Ochs, 2009)

Der in Gleichung (4-68) und (4-69) auftretenden Parameter  $b$  kann als Funktion des Wassergehalt  $u$  [Kg/m<sup>3</sup>] durch Gleichung (4-75) mathematisch beschrieben werden VDI WA:

$$b = 1 - \left(1 - \frac{u}{u_{fs}}\right)^9 \quad (4-75)$$

In dieser Formel ist  $u_{fs}$  der bei freier Sättigung auftretender Wassergehalt. Der Wassergehalt des porösen Stoffes und der Wassergehalt bei freier Sättigung werden folgendermaßen definiert:



$$u = \psi_w \cdot \rho_w \quad (4-76)$$

$$u_{fs} = \psi_{fs} \cdot \rho_w \quad (4-77)$$

wobei  $\rho_w=1000 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$  die Dichte des flüssigen Wassers ist.  $\psi_{fs}$  bezeichnet den Volumenanteil des flüssigen Wassers bei freier Sättigung auf dem Körnermaßstab. Es wird hier angenommen  $\psi_{fs} = \psi_{op}$ .

In (Ochs, 2009) werden verbesserte Korrelationen für  $b$  vorgeschlagen, welche jedoch von durch Messungen zu ermittelnden Parameter abhängen. Da entsprechende Messdaten nicht vorliegen wird mit der vereinfachten Korrelation nach Glg. (4-75) gerechnet.

Für die Berechnung der Schüttungswärmeleitfähigkeit werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Das Wasser kondensiert zuerst in den kleineren Körnerporen und erst bei höheren Wassergehalten ist flüssiges Wasser in den Zwischenkörnervolumen vorhanden. Die folgende Betrachtung bezieht sich zu niedrige Wassergehalte (bis 7% des gesamten Volumens), wobei das Zwischenkörnervolumen Flüssigwasserfrei ist.
- In der Luft zwischen den Körnern findet Dampfdiffusion statt. Der massenverbunden Energietransport kann wieder mit Gleichung (4-71) berücksichtigt werden. Der Anteil  $b$  (Gleichung (4-75)) wird gleich als der auf der Körnerscala angenommen.

Unter diesen Annahmen, wird dann das erweiterte Krischer-Modell (Abbildung 4-25) auf der Schüttungsmaßstab Angewendet.

In Abbildung 4-27 ist die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion des Wassergehalts und der Temperatur grafisch dargestellt. Bei niedrigen Temperaturen (bis circa 20°C) nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt ständig zu. Im Unterschied dazu erreicht diese bei höheren Temperaturen ein Maximum und reduziert sich dann wieder leicht mit weiter zunehmendem Wassergehalt. Dieses Verhalten ist dadurch erklärbar, dass mit steigendem Wassergehalt das für Dampfdiffusion zu Verfügung stehende Volumen geringer wird. Darüber hinaus, ist die Wärmeleitfähigkeit monoton steigend mit der Temperatur bei jedem Wassergehalt.

Abbildung 4-29 zeigt den Vergleich der Modellergebnisse mit anderen Messergebnissen aus der Literatur (Zegowitz, 2011) (Ochs, 2009). Es muss berücksichtigt werden, dass die in (Ochs 2009) untersuchten Materialien gewisse Unterschiede zu den hier untersuchten aufweisen. In (Zegowitz, 2011) ist eine lineare Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt zu erkennen. Die Temperatur der Messung ist nicht angegeben, es kann angenommen werden, dass die Messungen bei 10 °C stattfanden.

Aus den o.g. Gründen, dient der in Abbildung 4-29 dargestellte Vergleich grundsätzlich nur der Plausibilitätsprüfung des Modells. Die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen ist trotzdem akzeptabel für Wassergehalte bis 7% des gesamten Schüttungsvolumens. Höhere Wassergehalte können mit dem in diesem Bericht vorbestellten Modell nicht untersucht

werden. Das in (Ochs, 2009) vorgeschlagene Modell liefert auch für höhere Wassergehalte relativ gute Ergebnisse. Im Unterschied zu dem hier vorgestellten Modell wird die ganze Schüttung als homogen betrachtet, ohne zwischen Körner- und Schüttungsmaßstab zu unterscheiden. Demzufolge, ist dieses für die Untersuchung des Verdichtungsgrad der Schüttung nicht geeignet.

In Abbildung 4-29 sind wieder die simuliere Ergebnissen mit Messergebnisse aus (Ochs 2009) verglichen. Das Modell weist gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen für eine Temperatur von 20°C auf, wobei bei 40°C größere Abweichungen auftreten. Der Grund dafür ist u.a. auf eine mangelhafte Kalibrierung des Modells zurückzuführen.

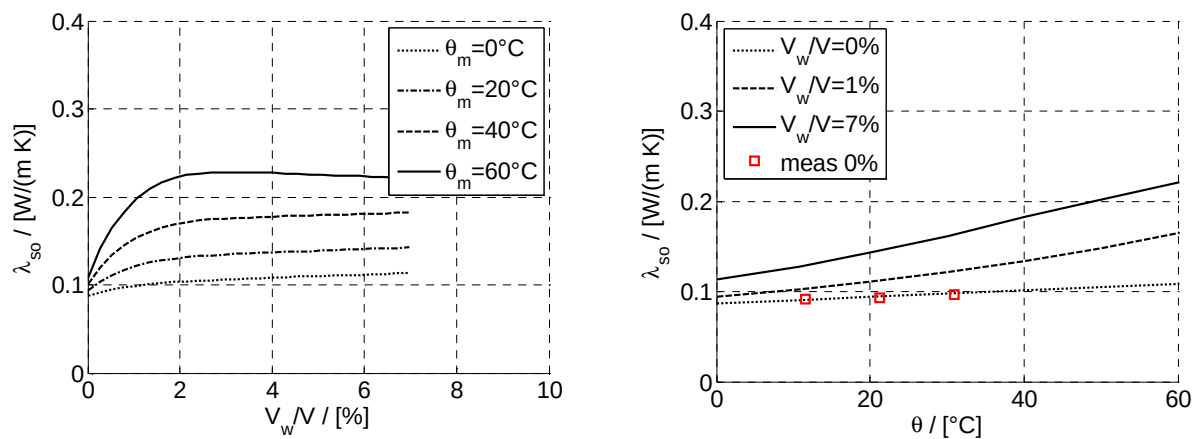


Abbildung 4-27: Wärmeleitfähigkeit der Schüttung als Funktion des relativen von Flüssigwasser gefüllten Volumenanteils (links) und der Temperatur (rechts) berechnet mit dem Krischer-Modell (Zwischenkörnervolumen:  $\psi=0.477$ ). Die mit trockenen Proben gemessenen werten sind dargestellt (meas 0%)

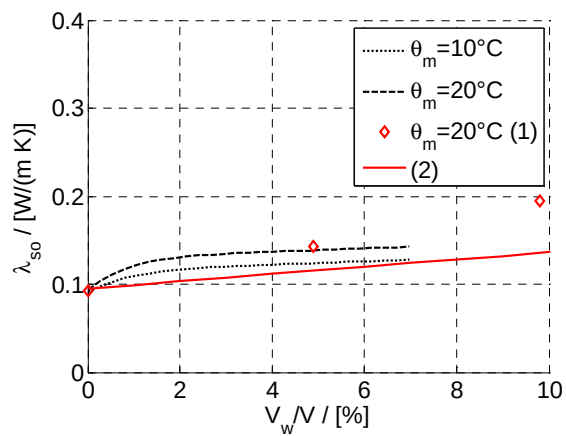


Abbildung 4-28: Vergleich der Modellergebnisse mit Messwerte von ähnlichen Materialien aus der Literatur.(1): (Zegowitz, 2011); (2): (Ochs, 2009)

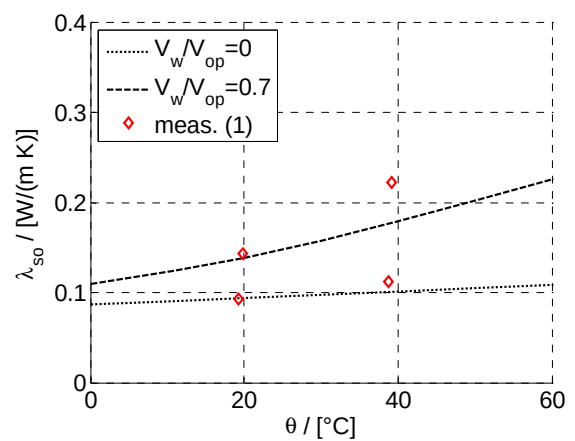
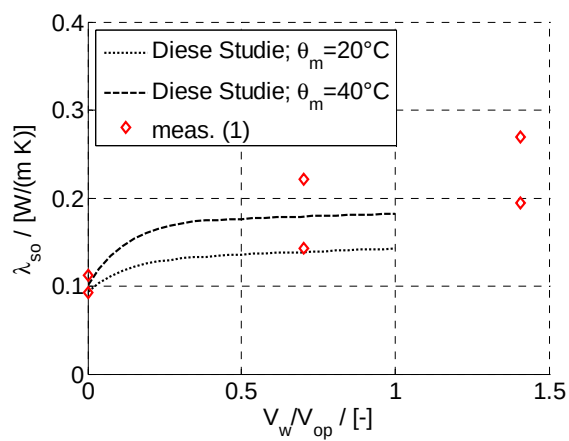


Abbildung 4-29: Vergleich der Modellergebnisse mit Messwerte von (Ochs, 2009).  $V_{op}$  bezeichnet das offene Volumen auf dem Körnermaßstab.

#### 4.8 AP8 – Ergänzungsversuche TU Wien

Die Rahmen des Arbeitspakets AP8 durchgeführten Versuche bzw. Untersuchungen sowie die zugehörigen Abschnitte sind in Tabelle 4-14 angeführt.

*Tabelle 4-14: Durchgeführte Versuche bzw. Untersuchungen und die zugehörigen Abschnitte des AP8*

| Untersuchungen bzw. Versuche                                                                    | Abschnitt                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Ermittlung der Korngrößenverteilungslinien des Ausgangsmaterials und des untersuchten Materials | 3.3.2; 3.3.5; 3.3.13       |
| Kompressionsversuche im Oedometer Ø250 zur Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens          | 3.3.4; 3.3.6;              |
| Großscherversuche zur Untersuchung der Schereigenschaften                                       | 3.3.10; 3.3.11             |
| Untersuchungen zur Überprüfung der Drainageeigenschaften                                        | 3.3.15                     |
| Versuch zur Verdichtung von GSG                                                                 | 3.3.3; 3.3.4; 3.3.5; 3.3.6 |
| Frostversuche mit wassergesättigten Proben                                                      | 3.2.4                      |

Ergänzend zu den in Tabelle 4-14 angeführten Untersuchungen wurden noch folgende Versuche im Arbeitspaket 8 durchgeführt.

*Tabelle 4-15: Ergänzende Untersuchungen bzw. Versuche zum AP8*

| Untersuchungen bzw. Versuche                                                                   | Abschnitt    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Einaxiale Druckversuche zur Ermittlung des Last-Verformungsverhalten des Einzelkorns           | 3.2.3        |
| Kompressionsversuche im Oedometer 500 x 500 mm zur Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens | 3.3.7; 3.3.8 |
| Versuche zur Wasseraufnahmefähigkeit                                                           | 3.3.14       |
| Ermittlung der Scherfestigkeit von GSG anhand von Triaxialversuchen                            | 3.3.12       |

#### 4.9 AP9 – Feldversuche

Eine detaillierte Übersicht über die durchgeführten Versuche an der TU Wien und die zugehörigen Ergebnisse können dem Abschnitt 3.5 entnommen werden.

Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche seitens der Firma Technopor Handels GmbH und die zugehörigen Ergebnisse können dem Abschnitt 3.6 entnommen werden.

## **5 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms**

### **5.1 Einpassung in das Programm**

Das Programm „Haus der Zukunft Plus“ strebt an, energierelevante Innovationen im Gebäudebereich einzuleiten bzw. ihre Markteinführung oder -verbreitung zu forcieren, um in weiterer Folge

- die Sicherheit und Nachhaltigkeit der Energieversorgung zu gewährleisten
- neue Technologien und Systemlösungen für den effizienten Energieeinsatz und die Nutzung erneuerbarer Energieträger zu entwickeln
- eine Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von österreichischen Unternehmen, die im Bereich der neuen Technologien und Systemlösungen arbeiten, zu unterstützen
- eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und somit der Klimaproblematik möglich zu machen

Die Schaffung von Grundlagen für den Einsatz von Glasschaumgranulat als wärmedämmenden aber zugleich tragfähigen Baustoff im Bereich der Gebäudefundierung spiegelt sich in allen oben genannten Punkten wieder. Das vorliegende Forschungsprojekt passt sich somit optimal in das Programm „Haus der Zukunft plus“ ein.

### **5.2 Beitrag zum Gesamtziel des Programms**

Zentrales Ziel des Programms ist es, die energetische Effizienz bezüglich Produktion und Betrieb von Gebäuden derart zu erhöhen, dass über deren gesamten Lebenszyklus die treibhausrelevanten Emissionen in Summe auf Null reduziert werden können. Dies kann aber nur dann gelingen, wenn der jährliche Primärenergieverbrauch der Gebäude unter der vor Ort produzierten erneuerbaren Energie liegt. Nachhaltige Gebäude der Zukunft erfordern folglich einen sehr hohen Wärmedämmstandard der gesamten Gebäudehülle, einschließlich aller erdberührten Bauteile. Eine Dämmung unterhalb der Fundierung, die eine ausreichende Tragfähigkeit und zugleich eine ausreichende Dämmwirkung aufweist, stellt dabei die bauphysikalisch optimale Variante dar, sowohl aus dampfdiffusionstechnischer Sicht als auch bezüglich der Vermeidung von Wärmebrücken. Glasschaumgranulat eignet sich für diesen Einsatzzweck, wurde aber aufgrund der mangelnden Kenntnisse im Bereich der bodenmechanischen und thermischen Eigenschaften erst in relativ wenigen Demonstrationsvorhaben verwendet. Das gegenständliche Forschungsvorhaben widmete sich der Aufgabe, die noch fehlenden Prüfverfahren und Kennwerte des innovativen Baustoffs zu erforschen und so die wissenschaftliche und technologische Basis für den breiten Einsatz im Standardmarkt schaffen. Damit stünde eine technisch innovative Lösung auch für großvolumige Gebäude mit schwierigen Gründungsdetails im Sinne eines wie oben beschriebenen Gebäudesektors mit entsprechender Planungssicherheit zur Verfügung.

### **5.3 Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt**

Die Firma Technopor Handels GmbH ist eine der Firmen neben anderen Herstellern (Misapor, Geocell, Glapor etc.), die Glasschaumgranulat produziert und den Einbau des Materials auf der Baustelle bei Bedarf durchführt bzw. für andere Firmen beim Einbau des Materials beratend tätig ist. Die Firma Technopor Handels GmbH war der Industriepartner im gegenständlichen Forschungsvorhaben und folglich bei der Konzeption und Planung des Vorhabens intensiv beteiligt. Fragestellungen seitens der Firma Technopor Handels GmbH hinsichtlich der Eignung von Glasschaumgranulatschichten als wärmedämmende und lastabtragende Schicht mit unterschiedlichen Stärken, unterschiedlichen Verdichtungsgraden, unterschiedlichen Einbaumethoden (1- oder 2-lagig) aber auch Fragen zur Abnahmeprüfungen von fertig eingebauten GSG-Schichten wurden bei der Planung der Versuche direkt berücksichtigt (siehe z.B. Abschnitt 3.1).

### **5.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungsbzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse**

Aus volkswirtschaftlicher Sicht können die Forschungsergebnisse in verschiedenen Bereichen zu positiven Auswirkungen und Nutzen führen. Es darf davon ausgegangen werden, dass es sich beim untersuchten Baustoff um eine der ganz wenigen, nachhaltigen und ökologischen Alternativen zu erdölbasierten wärmedämmenden Baustoffen handelt. Zudem ermöglicht das Material Ansätze für bisher ungelöste, systematische Wärmebrücken unter lastabtragenden Bauteilen. Mit verhältnismäßig geringem ökonomischen Aufwand und dabei ebenso geringem ökologischem Schadenspotential gelingt es einen völlig inerten, praktisch zeitlos nutzbaren Wertstoff herzustellen. Aus der gebrauchten Glasflasche, Autoscheibe, Marmeladeglas oder Leuchtstoffröhre wird ein innovativer Dämmstoff, welcher über Jahrzehnte hilft, wertvolle fossile Energieträger zu schonen. Die Ergebnisse des gegenständlichen Forschungsvorhabens bilden eine fundierte Basis für die Anwendung von Glasschaumgranulat. Die Wahrscheinlichkeit ist somit sehr hoch, dass der Einsatz von Glasschaumgranulat zur Regelanwendung im Bereich von lastabtragenden Bauteilen wird. Glasschaumgranulat, das aktuell ein Nischendasein fristet, sollte sich hin zu einem Standardprodukt entwickeln, was zu einer enormen Steigerung der Produktionsmengen bei den einzelnen Herstellern führen würde. Höhere Produktionsmengen und ein höherer Absatz bedingen in weitere Folge, dass Personal im Bereich der Herstellung, des Verkaufs und der Planung notwendig wird, womit wertvolle Arbeitsplätze im Umweltsektor geschaffen werden können.

Als Zielmarkt kann der gesamte europäische Markt genannt werden. Haupteinsatzgebiete aktuell sind Deutschland, Österreich und die Schweiz. In der nachfolgenden Tabelle sind die Gesamtmengen des abgesetzten Materials aller Wettbewerber (Körnung bis 50 mm) im deutschsprachigen Raum für das Jahr 2013 aufgelistet.

Tabelle 6 1: Erforderliche Mengen Glasschaumgranulat für Jahr 2013

|            | Österreich | Deutschland | Schweiz |
|------------|------------|-------------|---------|
| Menge [m³] | 400.000    | 1.200.000   | 300.000 |

Für den restlichen europäischen Raum werden Mengen im Bereich von ca. 2.000.000 m³ prognostiziert, wobei aber festgehalten werden muss, dass in diesem Bereich noch keine genauen Studien in Auftrag gegeben wurden. Die Schätzungen basieren einerseits auf Extrapolationen bisheriger Marktentwicklungen, andererseits auf der Annahme eines Substitutionsfaktors gegenüber den „herkömmlichen“ Dämmstoffen im Gründungsbereich. Gänzlich unbeachtet in diesen Schätzungen sind hierbei jedoch andere, noch mögliche Anwendungsbereiche des Materials, wie z.B. im Straßenbau, als Dachdämmung, als Beton-Zuschlagsstoff oder auch als Filtermaterial.

Die Technopor Handels GmbH wird die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse unmittelbar im bestehenden Markt kommunizieren und damit diesem Werkstoff bei zahlreichen Anwendungen und Bauvorhaben zum Durchbruch verhelfen. Derzeit sind zahlreiche Kunden aufgrund der noch offenen Fragestellungen zum Material und den damit verbundenen Lösungen sehr skeptisch und nehmen teilweise vom Einsatz dieses Materials Abstand. Alle gesammelten Ergebnisse und Erfahrungen werden dann im Rahmen der zu erwartenden Expansion des Unternehmens auch in umliegende, bisher noch nicht erschlossene Märkte im EU-Raum übertragen, wo dieser Werkstoff noch unbekannt ist und wo unter Berücksichtigung der Forschungsergebnisse gleich von Beginn an Glasschaumgranulat als Gründungslösung ohne offene Fragen etabliert werden kann. Selbstverständlich wird das Interesse dieses Material auch außerhalb des EU-Raums zunehmend einzusetzen steigen, vorab durch wissenschaftliche Veröffentlichung einerseits, begleitet durch Lizenzierung der Technologie andererseits.

## 6 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Auf Basis des vorliegenden Berichts können folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich des **Last-Verformungsverhaltens von Glasschaumgranulat (GSG)** gezogen werden:

### Einzelkorn:

- Die Reindichte  $\rho_r$  von GSG entspricht jener des jeweils verwendeten Ausgangsprodukts (Glasart) und liegt in der Größenordnung von 2,5 g/cm³.
- In Abhängigkeit vom Materialtyp schwankt die Rohdichte von  $\rho_s = 0,202$  bis 0,300 g/cm³ und der zugehörige Porenanteil von  $n_s = 0,883$  bis 0,920 g/cm³.
- Die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  wurde am Übergang vom „elastischen“ zum „plastischen“ Bereich definiert, bei dem es zu signifikanten Änderungen des Materialverhaltens kommt. In Abhängigkeit vom Materialtyp schwankt die einaxiale Druckfestigkeit von  $\sigma_{c,k} = 639,5$  bis 2348,4 kN/m². Innerhalb eines Materialtyps ist die Schwankungsbreite materialbedingt mehr oder weniger groß.



- Ein allgemeingültiger, korrelierbarer Zusammenhang zwischen der Rohdichte  $\rho_s$  und der einaxialen Druckfestigkeit von Glasschaumprismen ist nicht gegeben.
- Die Frostbeständigkeit des Einzelkorns konnte nicht nachgewiesen werden. Dementsprechend ist auch die Frostsicherheit des Korngemisches nicht gegeben.

#### Korngemisch:

- Die Korngrößenverteilungslinien der untersuchten Materialtypen unterscheiden sich kaum voneinander. Bei allen untersuchten Materialtypen liegt gemäß ÖNORM B 4400-1 eine eng gestufte Korngrößenverteilungslinie vor. Die Körner aller Materialtypen besitzen eine kubische Kornform, einen kantigen Rundungsgrad und eine raue Oberfläche.
- Die ermittelten Schüttdichten  $\rho_{d,G}$  für alle untersuchten Materialtypen liegen in einer Bandbreite von  $\rho_{d,G} = 0,132$  bis  $0,155 \text{ g/cm}^3$ . Die zur Schüttdichte  $\rho_{d,G}$  zugehörigen Porenanteile  $n_G$  der jeweiligen Materialtypen liegen in ein Bereich von  $n_G = 0,42$  bis  $0,50$ . Die nahezu identischen Porenanteile von  $n_G$  sind auf die geringen Unterschiede der Kornverteilungslinien der Materialtypen zurückzuführen.
- Für den Steifemodul der Erstbelastung  $E_{S1}$  zufolge der Kurzzeit-Kompressionsversuche und der Langzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm ist die Verdichtung C von maßgebender Bedeutung. Zuzufolge einer höheren Verdichtung C resultiert ein höherer Steifemodul  $E_{S1}$ .
- Der Steifemodul der Erstbelastung  $E_{S1}$  ist grundsätzlich von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  abhängig, jedoch zeigt sich, dass der Einfluss der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  auf den Steifemodul  $E_{S1}$  bei den durchgeführten Kurzzeit-Kompressionsversuchen im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm innerhalb der Bandbreite der Streuung der Versuchsergebnisse liegt.
- Für den Steifemodul der Erstbelastung  $E_{S1}$  zufolge der Langzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm ist die Verdichtung C von maßgebender Bedeutung. Zuzufolge einer höheren Verdichtung C resultiert ein höherer Steifemodul  $E_{S1}$ .
- Vergleicht man die Steifemoduln der Erstbelastung  $E_{S1}$  der einzelnen Kurzzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm, so ergibt eine höhere Verdichtung C höhere Steifemoduln  $E_{S1}$ .
- Der Einfluss der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  auf den Steifemodul  $E_{S1}$  zufolge der Kurzzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm liegt innerhalb des Streubereiches der durchgeführten Versuche.
- Für den Steifemodul der Erstbelastung  $E_{S1}$  zufolge der Langzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm ist die Verdichtung C von maßgebender Bedeutung. Zuzufolge einer höheren Verdichtung C resultiert ein höherer Steifemodul  $E_{S1}$ .

- Der Steifemodul der Erstbelastung  $E_{S1}$  zufolge der Langzeit-Kompressionsversuche im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm ist von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  abhängig. Der Einfluss der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  ist im Vergleich zu den Kurzzeit-Kompressionsversuchen stärker ausgeprägt.
- Ein Vergleich der Steifemoduln  $E_{S1}$  der Kurzzeit- Kompressionsversuche zwischen den Proben im Oedometer mit einem Durchmesser von 250 mm und den Proben im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm zeigt, dass die Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm wesentlich höhere Steifemoduln  $E_{S1}$  als die Proben im Oedometer 500 mm x 500 mm besitzen. Dies wird auf die unterschiedlichen Randbedingungen bei der Verdichtung der Proben zurückgeführt. So kommt es bei der Verdichtung der Proben im Oedometer 500 mm x 500 mm seitlich der lastverteilenden Platte zu Auflockerungen im Korngemisch. Diese Auflockerungen sind bei der Verdichtung der Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm durch die vollflächig aufliegende Platte auf der Probenoberseite nicht möglich. Dadurch liegt nach der Verdichtung der Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm ein besserer Formschluss zwischen den Körnern (= Kornverspannung) vor, was zu höheren Steifemoduln  $E_{S1}$  der Proben im Oedometer  $\varnothing 250$  mm führt. Zusätzlich hat die Wandreibung zwischen den GSG-Körnern und dem Oedometer  $\varnothing 250$  mm einen vergleichsweise größeren Einfluss auf die Versuchsergebnisse als dies bei den Versuchen im Oedometer 500 mm x 500 mm der Fall ist.
- Für die Ermittlung des Steifemoduls sind entsprechend große Oedometer zu verwenden. Im Zuge der Untersuchungen zeigte sich, dass die auf Basis eines Oedometers mit einer Seitenlänge von 500 mm x 500 mm ermittelt Steifemoduln die Steifigkeit von GSG-Schichten realitätsnahe beschreiben.
- Die im Zuge des Forschungsvorhabens ermittelten Steifemoduln der Erstbelastung liegen in Abhängigkeit von der Spannung und des Materialtyps in einem Bereich von rund  $E_{S1} = 1,0$  bis  $6,0$  MN/m<sup>2</sup>.
- Die Steifemoduln der Wiederbelastung  $E_{S2}$  sind um ein Vielfaches größer als jene der Erstbelastung  $E_{S1}$ . Dies gilt unabhängig von den verwendeten Oedometern ( $\varnothing 250$  mm, 500 mm x 500 mm) und der Zeitdauer (Kurz- und Langzeitversuch) der durchgeführten Kompressionsversuche.
- Die im Zuge des Forschungsvorhabens ermittelten Steifemoduln der Wiederbelastung liegen in Abhängigkeit von der Spannung und des Materialtyps auf Basis von Langzeit-Kompressionsversuchen im Oedometer mit einem Querschnitt von 500 mm x 500 mm in einem Bereich von  $E_{S2} = 15,7$  bis  $83,8$  MN/m<sup>2</sup>.
- Rahmenscherversuche sind für die Ermittlung der Scherfestigkeit von GSG nicht geeignet.

- Die Ermittlung der Scherfestigkeit von GSG erfolgte mit Hilfe von Triaxialversuchen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass GSG eine im Vergleich zu Böden ähnliche Scherfestigkeit besitzt.
- Für die Mobilisierung von Scherspannungen innerhalb von GSG-Schichten sind im Vergleich zu Böden jedoch wesentlich größere Verformungen notwendig. Dies ist vor allem beim Nachweis der Grundbruch- und Gleitsicherheit von Fundierungen zu berücksichtigen.
- Die Neigung zur Kornverfeinerung bei einer definierten Beanspruchung ist von der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  der Materialtypen abhängig.
- Die Wasseraufnahmefähigkeit der Materialtypen nach einer 24-stündigen Lagerung unter Wasser liegt in einem Bereich von 8,5 Vol.% bis 11,8 Vol.% bezogen auf das Volumen des Korngemisches.
- Die Durchlässigkeit der Materialtypen ist mit jener von Drainagekies vergleichbar. Es ergeben sich somit Durchlässigkeitsbeiwerte von rund  $k_f = 1 \cdot 10^{-1} \div 1$  m/s.

#### Großmaßstäbliche Untersuchungen am Korngemisch

- Für den Verformungsmodul der Erstbelastung  $E_{V1}$  ist das Maß der Verdichtung von maßgebender Bedeutung. Unabhängig vom Materialtyp, von der Schichtstärke, der Fundamentbreite oder der Art des Einbaues (1- oder 2-lagig) resultiert aus einer stärkeren Verdichtung C ein höherer Wert des Verformungsmoduls und somit ein steiferes Verhalten der GSG-Schicht. In der Praxis sollte somit auf eine einwandfreie Verdichtung der GSG-Schicht besonderer Wert gelegt werden.
- Die Größe des Verformungsmoduls der Erstbelastung  $E_{V1}$  ist auch von der Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  des Einzelkornes abhängig. Mit ansteigender Druckfestigkeit vergrößert sich auch der Wert des Verformungsmoduls der Erstbelastung  $E_{V1}$ .
- Die Art des Einbaues von GSG in Lagenstärken von maximal 50 cm (1- oder 2-lagig) besitzt einen geringen Einfluss auf die sich einstellende Größe des Verformungsmoduls der Erstbelastung  $E_{V1}$ .
- Der Verformungsmodul der Wiederbelastung  $E_{V2}$  ist um ca. eine Zehnerpotenz größer, als jene der Erstbelastung.
- Die ermittelten Verformungsmoduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  weisen zum Teil eine sehr hohe Streuung auf, was auf die Streuung der Materialkennwerte (Druckfestigkeit, Bruchfestigkeit) zurückzuführen ist (Tabelle 3-8).
- Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von GSG-Schichten zeigten, dass sich ein Versagensmechanismus einstellt, der durch einen „Fließzustand“ gekennzeichnet ist, wobei die Verformungen zunehmen, die Belastungen aber nicht weiter gesteigert werden können. Der Versagensmechanismus beruht somit auf einem duktilen Materialverhalten.

- Der dynamische Lastplattenversuch mittels des Leichten Fallgewichtsgerätes ist ein geeigneter Versuch zum Nachweis einer ausreichenden Verdichtung von GSG-Schichten. Bei der Messung empfiehlt sich die Verwendung eines Auflastringes rund um die Lastplatte, womit Einflüsse durch das seitliche Verdrängen der GSG-Körner auf die Versuchsergebnisse reduziert werden können. Der durch die Verdichtung hergestellte Formschluss zwischen den Körnern (= Kornverspannung) bleibt während der dynamischen Lastplattenversuche an Proben mit einer Auflast nahezu erhalten. Somit repräsentiert der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd, mA}$ , ermittelt mittels Auflastring, das Last- Verformungsverhalten der GSG-Schicht deutlich besser als Versuche ohne einen Auflastring.

#### Allgemeines:

- Die Benennung der verschiedenen GSG-Produkte erfolgte bis dato auf Basis der Schüttdichte, welche jedoch nur eine geringe Aussagekraft hinsichtlich des Last-Verformungsverhalten von GSG-Schichten aufweist. Vielmehr sollten die Materialien auf Basis der zugehörigen einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{c,k}$  benannt werden.
- Für die Steifigkeit von GSG-Schichten im Zuge der Erstbelastung ist das Maß der Verdichtung von maßgebender Bedeutung. Unabhängig vom Materialtyp, von der Schichtstärke, der Fundamentbreite oder der Art des Einbaues (1- oder 2-lagig) resultiert aus einer stärkeren Verdichtung C ein höherer Wert des Verformungsmoduls und somit ein steiferes Verhalten der GSG-Schicht. In der Praxis sollte somit auf eine einwandfreie Verdichtung der GSG-Schicht besonders Wert gelegt werden.
- Die Steifigkeit von GSG-Schichten im Zuge der Wiederbelastung ist um ca. eine Zehnerpotenz größer als jene der Erstbelastung.

#### Einfluss von GSG-Schichten auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden:

- Mit höher werdenden Steifemoduln der Bodenschichten und bei geringer werdenden Spannungen in der Fundamentsohle steigt der Einfluss der GSG-Schicht auf das Setzungsverhalten des Bauwerks.
- Ist der Steifemodul des Bodens größer als jener der GSG-Schicht, führt dies zu einer Abminderung des Bettungsmoduls des Gesamtsystems. Insbesondere bei niedriger werdenden Spannungen in der Fundamentsohle und bei höher werdenden Steifemoduln der Bodenschichten wächst der Einfluss der GSG-Schicht auf den Bettungsmodul der Bodenplatte.
- Eine unter der Fundierung eines Bauwerks angeordnete GSG-Schicht beeinflusst die Interaktion zwischen dem Bauwerk und dem Untergrund. Die Beeinflussung ist vor allem bei vergleichsweise steifen Untergrundverhältnissen gegeben.

- Eine unter einem Punkt- oder Streifenfundament angeordnete GSG-Schicht beeinflusst die Grundbruchlast der Fundierung. Inwieweit die GSG-Schicht zu einer Reduktion oder zu einer Erhöhung der Grundbruchlast führt, ist im Einzelfall zu überprüfen.
- Eine unter der Fundierung befindliche GSG-Schicht besitzt einen deutlichen Einfluss auf den Gleitsicherheitsnachweis, welcher in erster Linie auf die Beschränkung der zulässigen Scherdehnungen innerhalb der GSG-Schicht zurückgeführt werden kann. Diese ist jedoch für die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit (und damit auch der Tragfähigkeit) von horizontal belasteten Gebäuden notwendig.

Auf Basis des vorliegenden Berichts können folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich der **Wärmeleitfähigkeit von Glasschaumgranulat (GSG)** gezogen werden:

Eine innovative Ein-Platten-Messapparatur wurde für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verdichtungsgrade entwickelt und am Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen der Universität Innsbruck aufgebaut. Diese Apparatur ermöglicht die Untersuchung des Einflusses des Verdichtungsgrads, der Temperatur und des Wassergehalts auf die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung. Die Probe kann in der Apparatur verdichtet und unter Vakuum untersucht werden. Die Wärmestromrichtung ist von oben nach unten gerichtet, um den realen Einbaubedingungen zu entsprechen. Damit wird Konvektion in der Schüttung ausgeschlossen.

Den Einfluss der Temperatur und des Verdichtungsgrads auf die Wärmeleitfähigkeit von trockenen Glasschaumgranulat Proben wird messtechnisch untersucht. In diesem Bericht werden außerdem mathematische Modellen zur Prognose der Wärmeleitfähigkeit von trockenen und feuchten Schüttungen präsentiert. Eine Erweiterung des Modells für die Wärmeleitfähigkeit wird vorgestellt. Damit lassen sich Schüttungen aus porösen Körnern besser darstellen. Diese Modelle werden dann anhand der in dieser Studie gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit und zusätzlich anhand von Werten von anderen Autoren validiert bzw. kalibriert.

Die Hauptidegebnisse dieser Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit vom Glasschaumgranulat liegen im Bereich von  $0.08 \text{ W/(m K)}$  bis  $0.1 \text{ W/(m K)}$  und streuen damit relativ stark. Die Streuung nimmt mit zunehmender Verdichtung ab. Die Wärmeleitfähigkeit liegt dann bei etwa  $0.08 \text{ W/(m K)}$  (Messwert der Wärmeleitfähigkeit).
- Die Wärmeleitfähigkeit vom Glasschaumgranulat nimmt mit zunehmender Temperatur leicht zu.
- Die Wärmeleitfähigkeit steigt bei geringen Temperaturen, d.h.  $20^\circ\text{C}$  und kleiner näherungsweise linear mit zunehmender Feuchte. Bei einem Feuchtegehalt von 20 Vol% erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit auf etwa  $0.15 \text{ W/(m K)}$  bis  $0.2 \text{ W/(m K)}$ .

- Die Wärmeleitfähigkeit vom Glasschaumgranulat nimmt mit zunehmender Verdichtung leicht ab, allerdings nimmt bei gleich bleibender Materialmenge der thermische Widerstand der Probe ab, da die Dicke der Probe beim Verdichten entsprechend geringer wird. Aus thermischer Sicht sollte entsprechend die Verdichtung so gering wie möglich ausfallen.
- Die vorgestellten mathematischen Modelle können gut die Messwerte von trockenen Proben und von Proben mit geringem Wassergehalt nachbilden. (Für höhere Wassergehalte kann das Modell von (Ochs, 2010) verwendet werden)

## 7 Ausblick und Empfehlungen

### 7.1 Ausblick

Die gewonnen Erkenntnisse sind Grundlage für folgende weiterführende Arbeiten:

- Die Entwicklung eines standardisierten Prozedere zur Klassifizierung von GSG.
- Die wissenschaftliche Untersuchung des Baustoffes GSG im Rahmen einer Dissertation eines der Autoren.

### 7.2 Empfehlungen

Aufgrund der im Forschungsvorhaben festgestellten schwankenden Eigenschaften der Produkte in Bezug auf das Last-Verformungsverhalten werden Arbeiten zur Sicherstellung der Kontinuität der Qualität der Materialien im Zuge des Produktionsprozesses empfohlen.

Die Weiterentwicklung des Modells nach Krischer auf den Körnermaßstab sollte zukünftig weiter verfolgt werden und durch weitere Messungen unterstützt werden. Weitere Untersuchungen mit Schwerpunkt auf den Einsatz von Glasschaumgranulat als Dämmstoff für große unterirdische Wärmespeicher folgen im Rahmen des FFG Projekts store4grid. Es soll der Einfluss der Feuchte weiter untersucht werden und zudem der Anteil der Konvektion bei Schüttungen mit Wärmestromrichtung von unten nach oben ermittelt werden.

## 8 Literaturverzeichnis

OENORM B 6015-1: Bestimmung der Leitfähigkeit mit dem Plattengerät

DIN EN 12664: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommeßplattengerät

DIN EN 12667:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand

DIN EN 12939:2001-02 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand.

[Gold 2012] Gold, G., Dietrich, M.: Einsatz von Glasschaumgranulat als Übergang zwischen einer setzungsarmen Tiefgründung und einer hohen Dammschüttung mit großem Restsetzungspotential, 3rd International Seminar on Earthworks, Berlin 2012.

[Krischer 1978] Krischer/Kast: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, ISBN 3-540-08280-8, Springer Verlag, Darmstadt 1978

[Ochs 2007b] Ochs, F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H.: Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer, elsevier, Stuttgart 2007

[Ochs 2010] Ochs F. Modelling Large-Scale thermal energy stores, Diss. ITW Uni Stuttgart, 2010.

[Zehner & Schlünder 1970] Zehner, P., & Schlünder, U. (1970). Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei mäßigen Temperaturen. Chem.-Ing.-Tech. 44, 1303–08.

[VDI Wärmeatlas 2012] VDI Wärmeatlas, Springer 2012.

[Zegowitz 2011] Zegowitz, A.: Schaumglasschotter als Wärmedämmung. Fachsymposium des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, IBP, 2011.

[Brandl 2004] Brandl, H.; Adam, D.; Kohlböck, D.: Technischer Bericht zur Versuchsreihe Hasopor Glasschaum Granulat. Technische Universität Wien, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Wien 2004.

[Brandl 2003] Brandl, H.; Adam, D.; Kopf, F.; Niederbrucker, R.: Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz – Grundlagenforschung und praktische Anwendung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie – Straßenforschung Heft 533, Wien 2003

[Kézdi 1970] Kézdi, Á.: Handbuch der Bodenmechanik, Band II, Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau, VEB Verlag für Bauwesen, Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest, Budapest 1970

[Szczyrba 2011] Szczyrba, S.: Ergebnisbericht – Bestimmung der Scherparameter Glasschaumgranulat Technopor Perimeter 50/170, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Freiberg 2011



## 9 Anhang

### 9.1 Messwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10 (23/50)}$ , $\lambda_{10 (23/80)}$

Der angegebene Wert für  $\lambda$  entspricht dem Wert  $\lambda_{10, tr}$  bzw.  $\lambda_{10}$ , da im trockenen Zustand gemessen wurde. (lt. ÖNORM B 6015-2)

Für Schaumglas ist unter den Bedingungen 23°C, 50% relative Feuchte ( $\lambda_{10 (23/50)}$ ), bzw. 23°C, 80% relative Feuchte ( $\lambda_{10 (23/80)}$ ) derselbe Wert wie der unter trockenen Bedingungen angegeben, jedoch ist die Dichte hier nur bis 150 kg/m<sup>3</sup> angeführt. Für höhere Dichten sind keine Zuschlagswerte in der Norm zu finden.

### 9.2 Nennwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D$ , Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_r$

ÖNORM B 6015-5 schreibt bei Vorliegen nur eines Meßwertes (bis zur endgültigen Festlegung von  $\lambda_D$  eines bzw.  $\lambda_r$  müssen über einen Zeitraum von maximal 4 Jahren mind. 3 Messungen mit mindestens einem zeitlichen Abstand von einem Monat zwischen zwei Messungen vorgenommen werden) einen Zuschlag von 25% zum erhaltenen Meßwert  $\lambda_{10 (23/80)}$  bzw.  $\lambda_{10 (23/50)}$  vor.<sup>1</sup>

Dieser Wert gilt für 2 Jahre, bis zum Vorliegen von drei Meßwerten, liegen die geforderten drei Meßwerte vor, können die beiden Werte mit statistischen Auswertungen (90%-Fraktile) festgelegt werden.

---

<sup>1</sup> ÖNORM B 6015-5; 4.2: Erstmalige Festlegung von  $\lambda_d$  und  $\lambda_r$  bei Beginn der Produktion