

## EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR TRAGFÄHIGKEIT VON GLASSCHAUMGRANULAT

### 1. KURZFASSUNG:

Glasschaumgranulat ist ein aus Altglas bzw. ein aus daraus produziertem Glasmehl kontrolliert aufgeschäumter Recyclingbaustoff, der sich aufgrund seiner Eigenschaften prinzipiell dazu eignet, im Bereich von erdberührten Bauteilen als lastabtragende und zugleich wärmedämmende Schicht eingesetzt zu werden. Die Universität Innsbruck und die TU Wien arbeiten gemeinsam an einem vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Zuge des Programms „Haus der Zukunft plus“ unterstützen Forschungsvorhaben, das neben der Untersuchung der bauphysikalischen Eigenschaften auch den Nachweis der Eignung hinsichtlich der Tragfähigkeit von Glasschaumgranulatschichten erbringen soll. Der gegenständliche Beitrag beschäftigt sich mit der Durchführung und den ersten Ergebnissen des hinsichtlich der Tragfähigkeit entwickelten Versuchsprogramms.

### 2. ALLGEMEINES

Sparsamer Umgang mit Ressourcen, Energieeinsparung und Forderungen zur Nachhaltigkeit sind Aspekte im Bereich des Bauens, die unabhängig von der Art der Konstruktion zunehmend an Bedeutung gewinnen. Der Einbau von Wärmedämmung direkt unter lastabtragenden Bauteilen stellt hierbei einen Teilbereich dar, der zur Erreichung der genannten Aspekte von besonderer Bedeutung ist. Dämmstoff raumseitig auf der Bodenplatte anzuordnen, weist erhebliche bauphysikalische Nachteile auf, wie z.B. die Gefahr der Taupunktunterschreitung an der Bodenplatte oder die Tatsache, dass alle aufsteigenden Außen- und Trennwände potenzielle Wärmebrücken darstellen, da in diesen Bereichen die Bodendämmung unterbrochen wird. In der Vergangenheit scheiterte der Einbau einer Dämmung direkt unter einem lastabtragenden Bauteil vielfach an geeigneten Materialien, die die notwendige Druckfestigkeit oder die notwendige Feuchtebeständigkeit aufweisen. Die generelle Neuheit bei der Anwendung von Glasschaumgranulat (Abbildung 1) besteht darin, dass mit diesem Recyclingbaustoff nun auch ein granuläres Medium zur Verfügung steht, das durch seine Eigenschaften alle Voraussetzungen erfüllt, um im Gründungsbereich die Übertragung von Lasten in Kombination mit einem guten Wärmedämmvermögen zu ermöglichen.



Abbildung 1: Glasschaumgranulat

Durch seine anorganische Natur ist Glasschaumgranulat unverrottbar und beständig gegen Fraß- und Kohlenwasserstoffschäden. Aus der geringen Schüttdichte von Glasschaumgranulat (am Markt wird Glasschaumgranulat mit unterschiedlichen Schüttdichten im Bereich von 150 bis 210 kg/m<sup>3</sup> angeboten) resultiert neben der einfachen Handhabung im Zuge des Einbaus eine in Summe geringere Belastung des Baugrundes und aufgrund der grobkörnigen Struktur kann dem Material zudem eine dränierende Wirkung zugeschrieben werden.

Bezogen auf die Produktion von Glasschaum unterscheidet man prinzipiell 2 Herstellungsverfahren: die Nassschäumermethode bzw. die Trockenschäumermethode. Prinzipiell besteht die Aufgabe bei der Herstellung in beiden Fällen darin, eine Gasblase, die erst bei Temperaturen entstehen darf, bei der das Glasmehl zu Sintern begonnen hat, im dem dann zähflüssigen Glas einzuschließen.

Die Nassschäumer lösen dieses Problem über eine Mischung des an sich trockenen Glasmehlpulvers mit flüssigen Bestandteilen wie Wasserglas und Glycerin. Der darin enthaltene Kohlenstoff verbrennt bei Temperaturen über dem Erweichungspunkt von Glas (rund 650-750 °C) zu CO und CO<sub>2</sub> und bildet so jene Bläschen, die in Folge der Hitzeeinwirkung expandieren und den Schäumeffekt bewirken. Die feuchte Mischung wird auf einem Kaolin-getränkten Glasvlies aufgebracht und kontinuierlich durch einen Ofen bewegt, wobei sie einer festgelegten Temperatureinwirkung ausgesetzt wird. Das Endprodukt ist sehr feinporig aufgeschäumt, dunkelgrau bis schwarz und grobschollig.

Die Trockenschäumer verwenden als Aktivator (Aufschäumer) Karbide. Diese werden in trockener und pulvriger Form mit dem Glasmehl vermischt und trocken auf ein endloses Edelstahlblech aufgebracht, das kontinuierlich durch einen Ofen bewegt wird. Die Heizenergie wird dabei durch Stromregister sehr gezielt eingebracht und das Material so einer zuvor festgelegten Wärmebehandlung unterzogen.

Hinsichtlich der Bezeichnung kann festgehalten werden, dass manche Hersteller, welche die Trockenschäumermethode zur Herstellung anwenden, ihr Material als „Glasschaumgranulat“ bezeichnen und so von der bislang gängigen Bezeichnung „Glasschaumschotter“ abweichen. An dieser Stelle sei noch einmal bemerkt, dass sich das gegenständlich beschriebene Forschungsvorhaben auf das mittels Trockenschäumermethode hergestellte Glasschaumgranulat bezieht.

Das Fehlen von wissenschaftlich fundierten Untersuchungen in Bezug auf das (boden-)mechanische Verhalten von Glasschaumgranulat führte bislang dazu, dass einerseits wichtige Fragestellungen betreffend den Einfluss von Glasschaumgranulatschüttungen auf das Setzungsverhalten, auf das Grundbruchverhalten, auf die Schnittgrößenverteilung in Gründungskörpern bzw. in Bezug auf die Sicherheit gegen Gleiten, überhaupt nicht beantwortet werden können, bzw. andererseits, dass das Material nach Messmethoden beurteilt wird, die das wahre Potential hinsichtlich der Tragfähigkeit nicht widerspiegelt (Bsp.: Beurteilung der aufnehmbaren Druckspannung gemäß deutscher Zulassung). Daraus resultiert, dass der Einsatz von Glasschaumgranulat in der Praxis bezogen auf die Tragfähigkeit aktuell nur unter Berücksichtigung von hohen Sicherheiten erfolgt, was die möglichen Einsatzbereiche reduziert, die Wirtschaftlichkeit verringert und einen objektiven Vergleich mit anderen Konkurrenzmaterialien nicht zulässt.

### 3. VERSUCHSPROGRAMM UNIVERSITÄT INNSBRUCK

Zur Ermittlung von (boden-)mechanischen Eigenschaften und in weiterer Folge des Einflusses von Glasschaumgranulat auf die erforderlichen geotechnischen Nachweise wurde eine Versuchsanordnung entwickelt und hergestellt, welche die folgenden Anforderungen erfüllt:

- 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 Verformungsverhalten von bis zu 2 m breiten Streifenfundamenten simuliert werden können – die Ergebnisse werden dann in weiterer Folge auch auf die Lagerungssituation von Einzelfundamenten und Bodenplatten übertragen;

- 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 (ebener Verformungszustand).
- 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 2 zeigt die entwickelte Versuchsanordnung. Der Behälter, in dem das Glasschaumgranulat eingebaut und verdichtet wird, ist 3,80 m lang, 70 cm breit und 60 cm hoch. Auf dem Versuchsrahmen ist eine hydraulische Presse montiert, mit der die jeweils erforderliche Belastung über eine auf der Granulatschicht lagernden Stahlkonstruktion (Laststempel) aufgebracht wird.

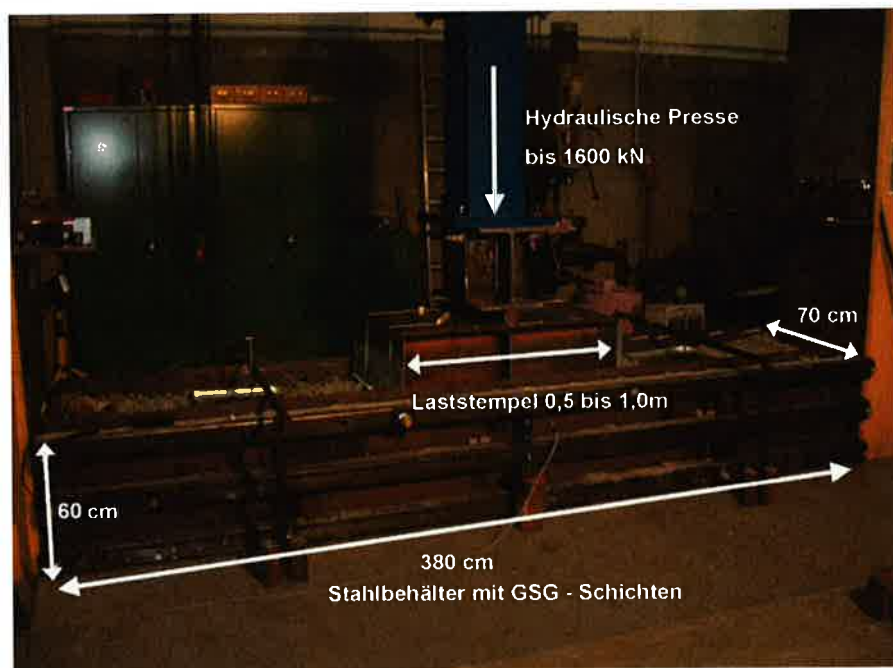


Abbildung 2: Versuchsanordnung der Universität Innsbruck

Insgesamt werden innerhalb des Forschungsvorhabens 192 Versuche durchgeführt, wobei folgende Einflussgrößen variiert werden:

Schüttdichte Glasschaumgranulat	Schichthöhe	Art des Einbaues	Verdichtung	Größe Laststempel L B=const=68 cm
150; 175; 210 kg/m <sup>3</sup>	15, 28; 50 cm	1- oder 2-lagig	10%; 15%; 20%; 25%	50 cm bzw. 100 cm

Auf Basis der im Zuge der Versuche gemessenen Werte der Verschiebung und der aufgetragenen Kraft am Laststempel kann ein Verformungsmodul in Abhängigkeit vom Lastniveau der jeweiligen Glasschaumgranulatschicht abgeleitet werden. Neben dem Verformungsmodul im Zuge der Belastung können durch zyklische Entlastungen und Wiederbelastungen auch die zugehörigen Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul ermittelt werden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Vergleich des Last- Verformungsverhaltens zwischen dem in der Praxis aktuell häufig ausgeführten Standardfall einer 50 cm starken, 2-lagig eingebauten Glasschaumgranulatschicht, mit einer Schüttdichte von 175 kg/m<sup>3</sup> und einer Verdichtung von 25% und einer Glasschaumgranulatschicht, die nur um 10% verdichtet wurde. Allgemein bedeutet eine x% starke Verdichtung, dass eine geschüttete Schichthöhe h um x% dieser Höhe auf eine Höhe von  $[h \cdot (x/100)]$  verdichtet wird. Die Größe des Laststempels L beträgt in beiden Fällen 100 cm.

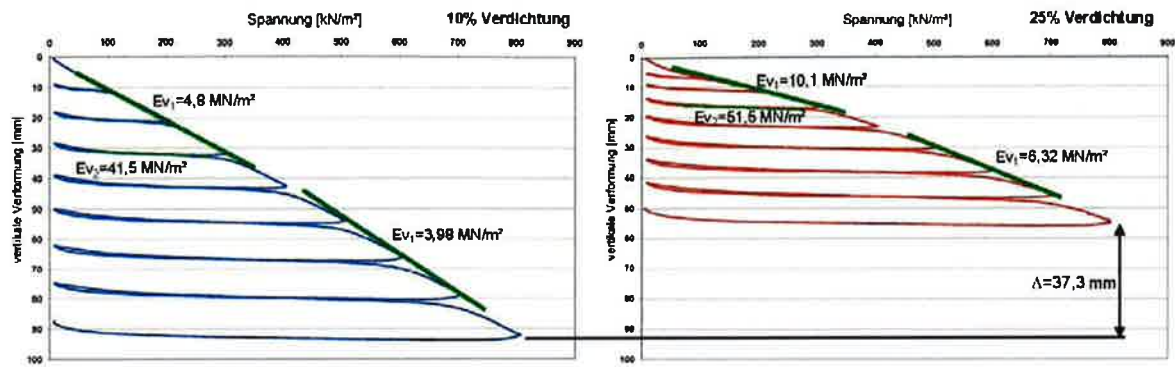


Abbildung 3: Vergleich Last- Verformungsverhalten zweier verschieden verdichteter Glasschaumgranulatschichten

Betrachtet man die auftretenden Verformungen, ist der große Einfluss der Verdichtung klar ersichtlich. Während sich bei der Glasschaumgranulatschicht mit 25% Verdichtung eine maximale Verformung von ca. 55 mm unter der höchsten Belastung im Zuge des Versuches von 800 kN/m<sup>2</sup> unter dem Laststempel einstellt (Standardbelastungen in der Praxis liegen im Bereich bis 300 kN/m<sup>2</sup>), beträgt die maximale Verformung der Glasschaumgranulatschicht mit 10% Verdichtung ca. 92 mm und ist somit um 67% größer als die Verformung bei 25% Verdichtung. Auch bezogen auf die sich einstellenden Verformungsmoduln im Zuge der Belastung ist der Einfluss der Verdichtung klar zu erkennen. Bei einer Verdichtung von 25% erhält man ca. doppelt so große Werte wie bei der Verdichtung von 10%. Unabhängig von der Verdichtung verhält sich das Material zu Beginn der Belastung steifer (größerer  $E_{v1}$ ), als bei einem höheren Lastniveau. Dieser Effekt konnte auch bei der Durchführung der Kompressionsversuche im Labor beobachtet werden. Im Fall der Wiederbelastung zeigt das Material ein sehr steifes Verhalten, wobei der Einfluss der Verdichtung in diesem Fall geringer ausfällt. Ein grundbruchartiges Versagen konnte auch bei sehr hohen Belastungen – zeitweise wurde die Belastung abweichend vom normalen Versuchsablauf auf Werte bis zu 1.700 kN/m<sup>2</sup> gesteigert – nicht beobachtet werden.

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen konnte weiters festgestellt werden, dass Glasschaumgranulat ein ausgeprägtes Kriechverhalten aufweist, weshalb auch Langzeitversuche, bei denen die Belastung über einen längeren Zeitraum konstant gehalten wird, erfolgten. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Kriechverformungen, wiederum am Beispiel einer 50 cm starken, 2-lagig eingebauten Glasschaumgranulatschicht, mit einer Schüttdichte von 175 kg/m<sup>3</sup> und einer Verdichtung von 25%. Ausgehend von einer Anfangsverformung von 16 mm unter einer Belastung von 300 kN/m<sup>2</sup> vergrößert sich die Verformung innerhalb einer Zeitspanne von ca. 3 Tagen um 31% auf 21 mm.

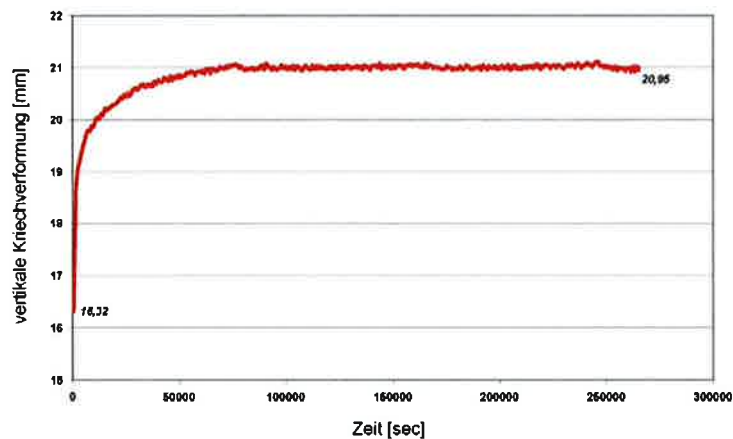


Abbildung 4: Kriechverformung von Glasschaumgranulat



#### 4. VERSUCHSPROGRAMM TU WIEN

Ergänzend zu den Arbeiten an der Universität Innsbruck werden im Erdbaulaboratorium der TU Wien weitere bodenmechanische Eigenschaften untersucht bzw. bestimmt. Die nachstehend beschriebenen Versuche wurden bis dato mit Glasschaumgranulat mit einer Schüttdichte von  $175 \text{ kg/m}^3$  durchgeführt.

##### 4.1 Versuche und Bestimmungen am Einzelkorn

Mithilfe von einaxialen Druckversuchen an geschliffenen Glasschaumprismen erfolgte die Bestimmung der Arbeitslinie von Glasschaum. Weiters wurde anhand einer repräsentativen Probenanzahl eine mittlere Bruchfestigkeit von  $3.911 \text{ kN/m}^2$  gemessen. Die Dichtebestimmung an den geschliffenen Prismen ergab eine mittlere Dichte von  $0,277 \text{ g/cm}^3$  des Einzelkorns. Abbildung 5 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt exemplarisch den Verlauf der Arbeitslinie anhand von zwei Versuchen.

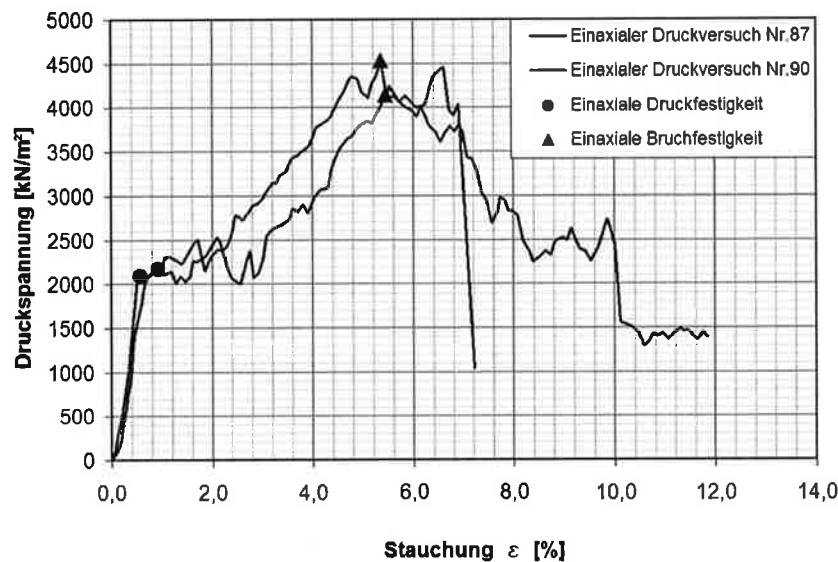


Abbildung 5: Materialverhalten von Glasschaum (Schüttdichte  $175 \text{ kg/m}^3$ ) im einaxialen Druckversuch anhand von 2 Versuchen

##### 4.2 Großrahmenscherversuche

Zur Ermittlung der Scherparameter wurden im Großrahmenschergerät der TU Freiberg Versuche bei Normalspannungen von  $25$  bis  $300 \text{ kN/m}^2$  und einer Verdichtung von  $25\%$  durchgeführt. Das Glasschaumgranulat wurde in einen Scherrahmen eingebaut, welcher Abmessungen von  $437 \text{ mm} \times 437 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  besitzt. Je nach Normalspannung traten die maximalen Schubspannungen bei einer Horizontalverschiebung von  $37 - 64 \text{ mm}$  auf. Es wurde ein Reibungswinkel von  $37,4^\circ$  bestimmt. Weitere Versuche sind in Planung.

##### 4.3 Kompressionsversuche und Zeit-Setzungsversuche

Die Kompressionsversuche werden in einem Ödometer mit einem Durchmesser von  $250 \text{ mm}$  durchgeführt. Das Glasschaumgranulat wird vor Versuchsbeginn im Ödometer verdichtet. Je nach Verdichtung ergibt sich eine Probenhöhe von etwa  $150 \text{ mm}$ . Aufgrund des Verhältnisses von Probendurchmesser zu Probenhöhe und der Mantelreibung kann eine Gewölbeausbildung im Ödometer nicht ausgeschlossen werden. Abbildung 6 stellt die Druck-Stauchungskurve eines Kompressionsversuches dar, aus welcher der Steifemodul in Abhängigkeit vom betrachteten Lastbereich abgeleitet wird. Eine entsprechende Interpretation der Ergebnisse der Kompressionsversuche erfolgt durch einen Vergleich mit jenen der Großversuche an der Universität Innsbruck.

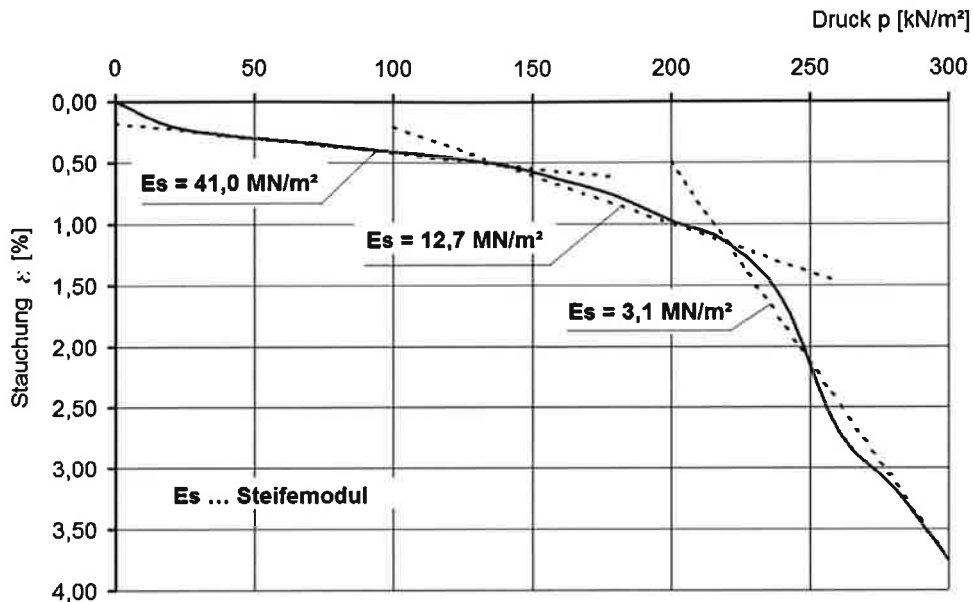


Abbildung 6: Ergebnisse Kompressionsversuch von Glasschaumgranulat (Schüttdichte 175 kg/m<sup>3</sup> bzw. Verdichtung 25%)

Bei den jeweiligen Laststufen des Kompressionsversuches werden die auftretenden Verformungen über die Zeit aufgezeichnet. Die Verformungen treten nicht sofort, sondern erst mit der Zeit auf. Die Zeitdauer bis zum Abklingen der Verformungen hängt von der aufgetragenen Normalspannung ab. Dies kann beim Kompressionsversuch bis zu 7 Tage in Anspruch nehmen.

#### 4.4 Versuche zur Verdichtung von Glasschaumgranulat

Um ein möglichst realistisches Last- Verformungsverhalten im Kompressionsversuch zu erhalten, muss das Glasschaumgranulat im Ödometer verdichtet werden. Zuzufolge dieses Umstandes wurde eine Methode zur Verdichtung im Proctortopf entwickelt. Hierbei erfolgt die Verdichtung mit Hilfe eines Rütteltisches und einer Auflast. Diese Methode ist wesentlich besser für die Verdichtung von Glasschaumgranulat geeignet, als beispielweise die Verdichtung mit dem Proctorhammer, bei dem es zu ausgeprägten Zertrümmerung der einzelnen Körner kommt.

#### 4.5 Feldversuche und Bestimmung der Durchlässigkeit und Frostsicherheit

Es ist im Zuge des Forschungsvorhabens geplant, Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit und der Frostsicherheit durchzuführen. Darüber hinaus werden bestehende Versuche für die Kontrolle des sachgemäßen Einbaus auf der Baustelle entsprechend adaptiert.

### 5. ZUSAMMENFASSUNG

An der Universität Innsbruck und an der TU Wien wird ein gemeinsames Forschungsvorhaben mit dem Ziel durchgeführt, die Eigenschaften von Glasschaumgranulat als lastabtragende Schicht unter Gründungskörper wissenschaftlich zu untersuchen. Die ersten Ergebnisse der Versuche in Innsbruck zeigen – abhängig von der Verdichtung – eine vergleichsweise hohe Tragfähigkeit der geprüften Glasschaumgranulatschichten, wobei aber beachtet werden muss, dass Glasschaumgranulat im Zuge der Erstbelastung einen um rund eine Zehnerpotenz niedrigeren Verformungsmodul aufweist, als im Zuge der Wiederbelastung. An der TU Wien systematisch durchgeführte Versuche zur Bestimmung der bodenphysikalischen Eigenschaften von Glasschaumgranulat, die sowohl am Einzelkorn als auch am Korngemisch durchgeführt worden sind, weisen bereits vor Abschluss der Untersuchungen auf die Eignung für lastabtragende Schichten unter Gründungskörpern hin.