



Nis Andresen, Andreas Zegowitz

Kennwerte und Rundversuch an Schaumglasschotterschüttungen (KRS)

Nis Andresen, Andreas Zegowitz

Kennwerte und Rundversuch an Schaumglasschotterschüttungen (KRS)

T 3382

T 3382

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0622-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-020/2019

Kennwerte und Rundversuch an Schaum- glasschotterschüttungen (KRS) – Abschlussbericht

Geschäftszeichen: P 52-5- 5.121-2010/17

Durchgeführt im Auftrag

Deutsches Institut für Bautechnik

Kolonnenstraße 30 L

10829 Berlin

Der Bericht umfasst

75 Seiten

59 Tabellen

24 Abbildungen

1 Anlage

Nis Andresen

Andreas Zegowitz

Stuttgart, 16. Dezember 2020

Abteilungsleiter

Dr.-Ing.
Hartwig Künzel

Bearbeiter

Dipl.-Ing. (FH)
Andreas Zegowitz

Bearbeiter

Dipl.-Ing. (FH)
Nis Andresen

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 1.1 | Ziel des Forschungsvorhabens | 4 |
| 1.2 | Hintergrund und Auftrag | 4 |
| 1.3 | Methoden | 4 |
| 1.4 | Untersuchte Verfahren und Prüfungen | 5 |
| 2 | Verwendete Materialien für die Rundversuche | 6 |
| 3 | Materialvorbehandlung | 7 |
| 3.1 | Ausgangssituation und Literatur | 7 |
| 3.2 | Entnahme aus dem Liefergebinde | 7 |
| 3.3 | Trocknen | 8 |
| 3.4 | Vorbehandeln im Mischer | 10 |
| 3.5 | Sandanteil | 12 |
| 3.6 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 13 |
| 4 | Schüttdichtebestimmung | 14 |
| 4.1 | Ausgangssituation und Literatur | 14 |
| 4.2 | Prüfzylinder | 15 |
| 4.3 | Einfüllen | 16 |
| 4.4 | Vergleichsmessungen | 18 |
| 4.5 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 19 |
| 5 | Korngrößenverteilung | 20 |
| 5.1 | Ausgangssituation und Literatur | 20 |
| 5.2 | Durchgeführte Messungen | 20 |
| 5.3 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 22 |
| 6 | Rohdichte des gelieferten Vollmaterials | 23 |
| 6.1 | Ausgangssituation und Literatur | 23 |
| 6.2 | Alternativen | 23 |
| 6.3 | Validierung des Messverfahrens | 25 |
| 6.3.1 | Wiederholpräzision | 25 |
| 6.3.2 | Vergleich von Messungen in beiden Laboratorien | 26 |
| 6.3.3 | Vergleich mit Pyknometer-Verfahren | 26 |
| 6.4 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 27 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7 | Druckspannung bei 10 % Stauchung | 29 |
| 7.1 | Ausgangssituation und Literatur | 29 |
| 7.2 | Anpassungen | 31 |
| 7.3 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 37 |
| 8 | Wärmeleitfähigkeit in trockenem und feuchtem Zustand | 38 |
| 8.1 | Ausgangssituation und Literatur | 38 |
| 8.2 | Bisheriges Vorgehen bei der Messung | 39 |
| 8.3 | Änderungen am Prüfverfahren, neuer einheitlicher Prüfrahen | 41 |
| 8.3.1 | Messung der Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand | 44 |
| 8.4 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 45 |
| 9 | Wasseraufnahme nach langzeitigem Eintauchen | 47 |
| 9.1 | Ausgangssituation und Literatur | 47 |
| 9.2 | Vergleichsmessungen | 47 |
| 9.3 | Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung | 49 |
| 10 | Zusammenfassung | 50 |
| 11 | Literatur | 53 |
| 12 | Anhang | 55 |
| 12.1 | Tabellen zu Kapitel 3: Materialvorbehandlung | 55 |
| 12.2 | Tabellen zu Kapitel 4: Schüttdichtebestimmung | 56 |
| 12.3 | Tabellen zu Kapitel 5: Korngrößenverteilung | 60 |
| 12.4 | Tabellen zu Kapitel 6 Rohdichte des gelieferten Vollmaterials | 61 |
| 12.5 | Tabellen zu Kapitel 7: Druckspannung bei 10 % Stauchung | 63 |
| 12.6 | Tabellen zu Kapitel 8: Wärmeleitfähigkeit in trockenem und feuchtem Zustand | 67 |
| 12.7 | Tabellen zu Kapitel 9: Wasseraufnahme nach langzeitigem Eintauchen | 72 |
| 13 | Anlage | 74 |
| 13.1 | Messkurve für Referenz Blähglas | 74 |

1 Einleitung

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Die für die nationalen und europäischen Zulassungen zugrunde liegenden Prüfverfahren zur Ermittlung der mechanischen und hygrothermischen Kennwerte von Schaumglasschotter für die Anwendung als lastabtragende Wärmedämmschüttung sollten überprüft und Vorschläge für angepasste Prüfanweisungen erarbeitet werden.

1.2 Hintergrund und Auftrag

Schaumglasschotter verändert seine Korngrößen aufgrund der herstellungsbedingten thermischen Spannungen in den Körnern bei Lagerung, Transport und Einbringung an der Baustelle als lastabtragender Schüttdämmstoff. Eine Produktnorm oder andere Norm existieren für dieses spezielle Material nicht. Die im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen in Bezug genommenen Normen enthalten Forderungen, die nicht immer direkt umsetzbar sind. Zur Vermeidung unterschiedlicher Interpretationen der Normen ist ein Erfahrungsaustausch der für das Bauprodukt anerkannten Überwachungsstellen vorgesehen. Dieses Forschungsvorhaben soll durch vergleichende Untersuchungen von Schaumglasschotterproben an zwei Prüfstellen zu einer optimalen Interpretation und Anwendung der in Bezug genommenen Normen beitragen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden daher das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) und das Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW) beauftragt, die Verfahren abzusichern und zu verbessern. Ziel dabei ist die Vergleichbarkeit der Prüfungen zu erhöhen und so eine höhere Marktvielfalt bei den Überwachern zu ermöglichen. Für die einzelnen Verfahren sollte eine Literaturrecherche und in beiden Laboren Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Abschließend sollten, soweit möglich, Empfehlungen gegeben und genauere Verfahrensbeschreibungen aufgestellt werden.

1.3 Methoden

Für die Untersuchungen wurden zunächst die vorhandenen nationalen und europäischen Zulassungen und relevanten Prüfnormen gesichtet. Anhand der Literaturrecherche und Erfahrungen aus früheren Laboruntersuchungen im Rahmen der Fremdüberwachung und Forschung wurden dann für jedes Verfahren Versuche geplant. Die Versuche wurden in Laboruntersuchungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) und am Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW) durchgeführt. Anhand der Vergleichsergebnisse wurden die Verfahren dann weiter entwickelt oder ein Verfahren festgelegt.

Der Ablauf dieser drei Arbeitsschritte wurde für alle untersuchten Prüfverfahren durchgeführt:

1. Versuchsplanung und Literaturrecherche
2. Laboruntersuchungen am IBP und FIW
3. Abschließende Auswahl der geeigneten Prüfungen und Vorschriften

Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Unterkapiteln bei den durchgeführten Untersuchungen aufgeführt.

Für die Messungen wurde Schaumglasschotter von zwei Herstellern bezogen und bei den Laboruntersuchungen für die Ringversuche eingesetzt.

Im weiteren Text werden die Ergebnisse aus den Prüfstellen bzw. Laboren mit Labor 1 und Labor 2 bezeichnet.

1.4 Untersuchte Verfahren und Prüfungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden folgende Prüfungen und Verfahren bearbeitet:

- Materialvorbehandlung
- Bestimmung der Schüttdichte (EN 1097-3)
- Bestimmung der Kornzusammensetzung (EN 933)
- Bestimmung der Rohdichte (EN1097-6)
- Bestimmung der Druckspannung (EN 826)
- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (EN 12667)
- Bestimmung der Wasseraufnahme (EN 12087)

2 Verwendete Materialien für die Rundversuche

Für die Ringversuche an dem Schaumglasschotter wurden zwei Materialien verwendet. Es handelt sich dabei um zwei Schaumglasschotter von zwei verschiedenen Herstellern der Korngröße 10/60, das nach nationalen Zulassungen für die Anwendung als lastabtragende Dämmschicht unter der Bodenplatte angewendet wird und im Nassschäumverfahren hergestellt wurde. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Proben zu erhalten, wurden in den zwei Herstellwerken jeweils 4 m³ Schaumglasschotter aus der Produktion entnommen. Diese Proben wurden dann aufgeteilt so dass beide Prüfinstitute jeweils 2 m³ von jedem Material zur Verfügung hatten.

Die Materialien der beiden Hersteller werden im Folgenden als Material A und Material B bezeichnet.

3 Materialvorbehandlung

3.1 Ausgangssituation und Literatur

Zur Vorbehandlung der Proben im Labor werden in den Prüfnormen und den nationalen und europäischen Zulassungen unterschiedliche Angaben gemacht. Diese betreffen die Trocknung des Schaumglasschotters, Entfernung von Feinanteilen und die Vorbehandlung in einem Trommelmischer. Zu diesen Punkten wurde in den technischen Regelwerken recherchiert und anhand von Versuchen der Einfluss auf den Schotter geprüft. Danach wurde zwischen den beiden Prüfstellen ein einheitliches Vorgehen abgestimmt.

3.2 Entnahme aus dem Liefergebilde

Schaumglasschotter wird auf Baustellen entweder als lose Schüttung im LKW, im Muldenkipper oder in Big Bags mit 1 bis 2 m³ Rauminhalt geliefert. Für die Messungen im Labor im Rahmen der Fremdüberwachung müssen ca. 300 l bis 500 l entnommen werden. Die Lieferung erfolgt daher oft, wie auch bei diesem Projekt, im Big Bag. Es ist fraglich, ob sich beim Abfüllen und Transport des Schotters die Zusammensetzung so ändert, dass keine repräsentative Probe mehr vorhanden ist. Es ist denkbar, dass sich die Schüttung entmischt und so, je nachdem aus welcher Schicht des Big Bags oder Vorratslagers Schotter entnommen wird, grundsätzlich andere Kennwerte gemessen werden. Wichtigstes Kriterium ist hierbei die Schüttdichte des Schotters und die Menge an Sand in der Schüttung.

Um diese Frage zu untersuchen wurde die Probe von Hersteller A, welche in einem 2 m³ Big Bag geliefert wurde, genauer untersucht. Das Big Bag wurde nicht von oben geöffnet sondern auf die Seite gelegt und der Länge nach aufgetrennt, wie in Bild 1 und Bild 2 zu sehen.



Bild 1: Gelieferter Big Bag von Hersteller A, Öffnen des 2 m³ Big Bags.



Bild 2: Gelieferter Big Bag von Hersteller A, Aufteilen der Probe.

In Anlehnung an DIN EN 932-1 [3] wurde die Probe in drei etwa gleich große Schichten aufgeteilt und diese einzeln für die weiteren Untersuchungen zur Seite gelegt. Beim Auftrennen der Probe war nicht zu erkennen, dass die Größe der Körnung in den verschiedenen Schichten wesentliche Unterschiede aufweist. Die Schüttdichte betrug in der obersten Schicht $128,9 \text{ kg/m}^3$, in der mittleren Lage $132,9 \text{ kg/m}^3$ und in der untersten Ebene $128,3 \text{ kg/m}^3$ (siehe Tabelle 19 bis Tabelle 21 im Anhang), jeweils gemessen nach der Behandlung im Mischer (Kapitel 3.4) und dem Verfahren nach Kapitel 4. Es ist also nicht wie vorher vermutet der Fall, dass die Schüttdichte von oben nach unten zunimmt. Vielmehr variiert die Schüttdichte im Schotter, jedoch nicht kontinuierlich in eine Richtung. Am Boden der Big Bags wurde eine deutlich sichtbare Sandschicht festgestellt. Dieser Sand bildete eine ca. 1 cm hohe Schicht aus Feinanteilen von weniger als 2 mm Korndurchmesser. Dieser Feinanteil wurde für die weiteren Messungen entfernt (siehe dazu auch Kapitel 3.5).

3.3 Trocknen

Die EAD [24] beschreibt die Produkteigenschaften im Hinblick auf bestimmte Anwendungen einer Produktgruppe. Die ETA-13/0549 [21] weist Produktleistungen, ermittelt auf Basis des EADs, für ein konkretes Produkt aus. Anwendungsregeln sind hier nicht in Bezug genommen. In der ETA sind lediglich Vorgaben zum Transport und der Lagerung zur Sicherstellung der Produktleistungen enthalten.

Für Laboruntersuchungen wird lediglich vor der Messung der Wärmeleitfähigkeit eine Trocknung bei 110 °C vorgeschrieben. In den nationalen Zulassungen z. B. [19] wird keine besondere Konditionierung gefordert; allerdings werden im Prüfplan des DIBt für die Untersuchung von losen Schüttungen aus Schaumglas bei der Rücktrocknung der Einzelstücke zur Bestimmung der Gesamtwasseraufnahme und Masseverluste 70°C und 105°C genannt genau wie bei der Prüfung der Druckspannung an Proben nach Unterwasserlagerung. In der Laborpraxis wurde im Labor 1 bisher der Schaumglasschotter grundsätzlich beim Probeneingang getrocknet, im Labor 2 wurde der Schotter nur getrocknet, wenn die Proben vorher erkennbar feucht geworden waren.

Um den Feuchtegehalt des Schaumglasschotters durch die Witterung zu prüfen, wurden verschiedenen Messungen durchgeführt. In Anlehnung an DIN EN 12429 [8] wurde an Schaumglasschotterproben die Wasseraufnahme bei 23 °C und 80 % relativer Feuchte geprüft. Die Messungen erfolgten an Schaumglasschotterproben, die wie oben beschrieben, an verschiedenen Stellen im Big Bag entnommen wurden. Außerdem wurde der Feuchtegehalt an Proben bestimmt, die einen Winter lang bzw. mehr als ein halbes Jahr im Außenlager, vor Regen geschützt, gelagert wurden, und an Proben, die bei Transport und Lagerung dem Regen ausgesetzt gewesen sind.

Tabelle 1: Gemessener Feuchtegehalt der Schaumglasschotterproben.

| Probe | Feuchtegehalt | Einheit |
|---|---------------|---------|
| Labor 23 °C/80 % r. F. | 0,16 | M.-% |
| Außenlager >180 Tage, offen, vor Regen geschützt | 0,15 | M.-% |
| Schaumglasschotter aus Big Bag-Lieferung, Schicht 1 bis 3 | 0,00 - 0,06 | M.-% |
| Untere Sandschicht aus Big Bag-Lieferung | 0,13 | M.-% |
| Schaumglasschotter, Regen ausgesetzt | 23,5 | M.-% |

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der einzelnen Messungen zusammengefasst. Es zeigt sich, dass das Schaumglas, solange kein direkter Kontakt mit Wasser vorhanden ist, sehr geringe Feuchtegehalte aufweist. Ein Feuchtegehalt von 0,16 M.-% würde bei einer angenommenen Einbaudichte von 200 kg/m³ einem volumenbezogenen Feuchtegehalt von 0,03 Vol.-% entsprechen. Die Feuchte in den gelieferten Proben lag bei Material A bei 0 bis 0,06 M.-%. Lediglich am Boden der gelieferten Big Bags sammelte sich Sand, der mehr Feuchte aufnimmt. Die im Regen gelagerte Probe hatte einen Feuchtegehalt von 23,5 M.-%, also deutlich mehr als alle anderen Proben.

Bei der durch direkten Regen feucht gewordenen Probe wurde beispielhaft aufgezeichnet, wie schnell die Proben auch bei niedriger Temperatur trocknen. Die Proben waren in einem Gewebesack mit jeweils ca. 220 l Rauminhalt gelagert. Die Trocknung erfolgte ohne Umfüllen, direkt im gelieferten Gewebesack im Umlufttrockenschrank bei einer Trocknungstemperatur von 50 °C.

Tabelle 2: Feuchteänderung bei der Trocknung von nassen Schaumglasschotterproben.

| | Masse Probe 1 | Masse Probe 2 | Mittlere Änderung der Masse |
|--------|---------------|---------------|-----------------------------|
| | kg | kg | M.-% |
| Beginn | 34,94 | 33,24 | - |
| 3. Tag | 28,63 | 26,84 | 22,94 |
| 5. Tag | 28,56 | 26,80 | 0,20 |
| 7. Tag | 28,58 | 26,75 | 0,01 |

Anhand der Messwerte aus

Tabelle 2 ist erkennbar, dass der Wassergehalt der Schaumglasschotterproben innerhalb von 3 Tagen fast vollständig zurückging. Nach 7 Tagen waren die Proben praktisch trocken.

Für die Messungen im Rahmen der Fremdüberwachung wird aufgrund der oben beschriebenen Messwerte empfohlen, Material, das der Witterung direkt, auch nur kurzfristig, ausgesetzt gewesen ist, zu trocknen. Eine Trocknungstemperatur von 50 °C scheint hier ausreichend zu sein. Bei Proben, die trocken gelagert wurden und nicht beim Transport feucht geworden waren, kann auf eine zusätzliche Trocknung verzichtet werden.

3.4 Vorbehandeln im Mischer

Der Schaumglasschotter wird nach der Produktion im Röhrenofen in den Herstellwerken über Förderbänder transportiert und dann, je nach Transportweg in Big Bags und Silos gefüllt oder auf einen offenen Haufen geschüttet. Für den Transport zur Baustelle wird der Schotter mindestens ein weiteres Mal umgeladen. Hierbei kommen meistens Radlader zum Einsatz. Beim Transport auf die Baustelle ist der Schotter dann Erschütterungen ausgesetzt und am Einbauort wird das Material mit Radladern oder Planierfahrzeugen verteilt und schließlich mit Rüttelplatten verdichtet. Bei all diesen Prozessschritten findet eine Veränderung der Körnung statt. Die Proben für die Fremdüberwachung werden aber direkt im Werk entnommen. Um hier eine Anpassung an das tatsächlich eingebaute Material zu erhalten, gibt der Prüfplan des DIBt für die Untersuchung von losen Schüttungen aus Schaumglas der Prüfstelle im Rahmen der Zulassungsmessungen die Möglichkeit die relevanten Parameter der Vorbehandlung festzulegen und zu dokumentieren. Daher wurde in den nationalen Zulassungen, zum Beispiel [18] bis [20], eine Vorbehandlung in einem Trommelmischer festgeschrieben. Die Art des Mixers und die Betriebsweise ist allerdings nicht genauer beschrieben. Um für die Vergleichsmessungen möglichst gleiche Proben zu erhalten wurden genauere Definitionen getroffen. Beide Labore beschafften sich einen identischen Trommelmischer mit einem Volumen von 125 l. Es wurde vereinbart, dass für die Vorbereitung die Trommel zur Hälfte mit Schaumglasschotter gefüllt wird. Dann wird der Mischer auf ca. 110° zur Seite gekippt und die Charge für 2 min gemischt. Auf diese Weise wurde der gesamte Schaumglasschotter vorbehandelt.



Bild 3: Trommelmischer zur Vorbehandlung des Schaumglas.

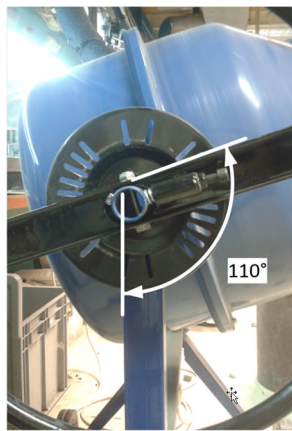


Bild 4: Winkelstellung der Mischtrommel.

An zwei Chargen mit jeweils einer Menge von ca. 200 l wurde die Schüttdichte direkt vor und nach dem Mischen bestimmt. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse aus den vier Messungen zusammengefasst. Durch die Behandlung im Mischer wird die Schüttdichte leicht, in einem Größenbereich von 1 % bis 2 % erhöht. Im Anhang sind die Einzelwerte der Schüttdichte vor und nach dem Mischen in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 3: Vergleich der Schüttdichte vor und nach der Vorbehandlung.

| | Mittlere Schüttdichte | | |
|---------|---------------------------|------------------------------------|-------------------|
| | Lieferzustand | 2 Minuten Vorbehandlung im Mischer | Einheit |
| Probe 1 | 127,7 | 128,9 | kg/m ³ |
| | Änderung der Schüttdichte | + 1,0% | - |
| Probe 2 | 131,0 | 132,9 | kg/m ³ |
| | Änderung der Schüttdichte | + 1,4% | - |

Auch wenn die Vorbehandlung nur einen kleinen Einfluss auf die Schüttdichte hat, so halten wir den Aufwand in der Vorbereitung weiter für sinnvoll. Die Körnung ist nach dem Mischen sichtbar weniger scharfkantig. Die Vorbehandlung kann also die Verhältnisse auf dem Lieferweg nachbilden.

3.5 Sandanteil

Schaumglasschotter erreicht als komprimierte Schüttung gute Druckfestigkeiten von 400 kPa bis 800 kPa. Die einzelnen Körner sind aber gegen Abrieb wenig widerstandsfähig. Bei jedem Umfüllen, Transportieren etc. wird so von der Oberfläche etwas Glasmehl bzw. Sand abgerieben. Dieser Sand fällt durch die grobe Körnung nach unten und sammelt sich am Boden. Diese Ansammlung von Sand ist in den Big Bags aus der Lieferung, beim oben beschriebenen Behandeln im Mischer und auch beim Herstellen von den Probekörpern festzustellen. Dieser Sand trägt nicht zu den bauphysikalischen Eigenschaften (Tragkraft und Wärmeleitfähigkeit) bei, erhöht aber wesentlich die gemessene Schüttdichte, da der Sand eine ca. 5-fach höhere Korndichte aufweist als die Schaumglasschotterkörnung.

Was als Sand abgetrennt werden kann, hängt von der Korngröße des Schaumglasschotters ab. Als Richtwert kann die Hälfte des Kleinstkorn angesehen werden (DIN EN 13055-1 [12] Anhang C). Für eine Schüttung mit der Körnung 10/60 kann also der Abrieb kleiner 5 mm abgetrennt werden.

Zum Abtrennen des Sandes hat sich ein Lochblech mit einer entsprechenden Lochgröße bewährt. Die Probe wird auf das Lochblech geschüttet und durch die Bewegung der Schüttung beim Entnehmen der Laborproben fällt der Sand nach unten heraus. Rütteln oder aktives Sieben ist nicht notwendig.



Bild 5: Abtrennen von Sand durch einen Kasten aus Lochblech.

3.6 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Anhand der oben aufgeführten Messungen werden folgende Empfehlungen für eine Prüfanweisung gegeben:

- Bei der Entnahme aus einem Big Bag oder anderem Liefergebilde muss das Material nicht extra homogenisiert werden.
- Der am Boden des Liefergebildes angesammelte Sand soll bei der Probenherstellung nicht verwendet werden.
- Proben, die sicher vor Niederschlag geschützt waren, müssen nicht getrocknet werden. Ist dieses nicht sichergestellt oder die Probe feucht, ist mindestens bei 50 °C 7 Tage zu trocknen.
- Der Schotter soll für 2 Minuten in einem 120 l Mischer mit der Hälfte der Trommelfüllung gemischt werden. Dabei ist die Trommel um ca. 110° zu neigen.
- Sand, der bei der Probenherstellung entsteht ist abzusieben oder auf andere geeignete Weise zu entfernen.

4 Schüttdichtebestimmung

4.1 Ausgangssituation und Literatur

Die Bestimmung der Schüttdichte spielt bei den Labormessungen eine zentrale Rolle. Für alle weiteren Versuche muss jeweils ein bestimmtes Volumen eines Probekörpers mit Schaumglasschotter befüllt werden. Bestimmt wird die benötigte Menge dabei über die Schüttdichte und Einwaage der entsprechenden Masse.

Die Basis für die Bestimmung der Schüttdichte bildet die DIN EN 1097-3: Schüttdichtebestimmung von Gesteinskörnungen [5]. Gemäß der Prüfnorm wird ein Zylinder mit der Körnung befüllt, die Oberfläche mit einem Lineal abgezogen und dann gewogen. Aus dem Volumen und der Masse wird die Schüttdichte der Körnung bestimmt. Für Schaumglasschotter ergeben sich hieraus einige Probleme. Zum einen ist der Schotter deutlich leichter (ca. 200 kg/m^3 Rohdichte) als übliche Gesteine (ca. 1000 bis 3000 kg/m^3), zum anderen ist die Körnung üblicherweise sehr grob (10 mm bis 75 mm Nenngröße, einzelne Körner auch bis 100 mm). Dabei sind die Körner auch weniger rund als bei üblichen Gesteinskörnungen. In der Summe führen diese Eigenschaften dazu, dass der Schaumglasschotter wenig »von selbst« verdichtet, da die einzelnen Körner nicht aneinander vorbei gleiten und weiter nach unten rutschen. Es können sich so »Brücken« in der Schüttung bilden. Auch das Glätten der Oberfläche mittels Lineal, wie in DIN EN 1097-3 beschrieben, ist nicht möglich. Die Körnung muss per Hand an der Oberfläche geglättet werden.

In den nationalen Zulassungen wird weiter definiert, dass die Schüttung mit einem mindestens 20 l großen Zylinder gemessen werden muss, das entspricht den Angaben in Tabelle 1 in DIN EN 1097-3 [5]. Die Mindestzahl von Prüfungen ist drei nach [5] oder 5 nach den aktuellen nationalen Zulassungen. Auch in der EAD [24] wird für die Schüttdichtebestimmung auf die EN 1097-3 verwiesen. Allerdings sollen dabei fünf Proben von drei unterschiedlichen Chargen gemessen werden.

In der Laborpraxis werden zur Zeit unterschiedliche Behältergrößen und verschiedene Verfahren beim Befüllen des Behälters angewendet. So wurde im Labor 1 mit einer Kornschaufel der Behälter befüllt und dieser leicht aufgeschlagen. Beim Labor 2 wurde das Füllen mit einer Abwiegeschale durchgeführt. Um die Abweichungen zwischen den Laboren gleich am Anfang möglichst gering zu halten wurde ein einheitlicher Messzylinder definiert (siehe Kapitel 4.2) und dann Messungen durchgeführt. Tabelle 4 zeigt die ermittelten Schüttdichten in Labor 1 und Labor 2. Die Ergebnisse zeigen für das Material B eine gute Übereinstimmung und für das Material A eine Differenz von 13 kg/m^3 (10% vom Messwert). Im Anschluss wurde das Verfahren genauer beschrieben und Vergleichsmessungen durchgeführt.

Tabelle 4: Ermittelte Schüttdichte vor der Abstimmung der Verfahren.

| | Schüttdichte | | |
|------------|--------------|---------|-------------------|
| | Labor 1 | Labor 2 | Einheit |
| Material A | 143 | 130 | kg/m ³ |
| Material B | 140 | 144 | kg/m ³ |

4.2 Prüfzylinder

Für den Prüfzylinder gibt die DIN EN 1097-3 [5] ein Mindestvolumen von 20 Litern bei Körnungen bis zu 63 mm vor. Außerdem muss das Verhältnis von Innendurchmesser zur Innenhöhe zwischen 0,5 und 0,8 betragen. Das Material des Behälters kann bei Leichtschüttungen aus Kunststoff sein, solange der Behälter stabil genug ist. Die Schaumglasschotter-Körnung ist zum Teil aber größer als 63 mm. Daher wurde ein größeres Volumen gewählt. Wie oben beschrieben, besteht das Problem im Glätten der Oberfläche. Um den durch die unebene Oberfläche verursachten Messfehler möglichst gering zu halten, sollte das Verhältnis Höhe zum Durchmesser am oberen Ende des in der Norm definierten Bereichs liegen. Laborgeräte in dieser Größe sind nur in Edelstahl erhältlich und entsprechend teuer. Um auch den Herstellern einen vergleichbaren Behälter zur Verfügung zu stellen, wurde der Prüfzylinder aus einem Standard Wasserrohr mit 300 mm Innendurchmesser gefertigt. Die Höhe beträgt somit $300 \text{ mm} / 0,5 = 600 \text{ mm}$ und das Volumen 42,4 l. Der Boden wird mit einer Sperrholzplatte verschlossen und wasserdicht eingeklebt. Das genaue Volumen des Zylinders muss gemäß Anhang B in EN 1097-3 [5] per Wasserverfahren bestimmt werden. In Bild 6 ist ein Beispielbehälter dargestellt.



Bild 6: Beispiel für einen Prüfzylinder zur Schüttdichtebestimmung.

4.3 Einfüllen

Das Befüllen des Schotters ist nach DIN 1097-3 [5] folgendermaßen beschrieben: »Während des Füllens ist durch Auflage der Schaufel auf den oberen Rand des Messgefäßes für eine möglichst geringe Entmischung zu sorgen. Die Schaufelkante darf zu keiner Zeit höher als 50 mm über den Rand des Messgefäßes gehalten werden.« Ein Rütteln oder Aufstampfen der Proben ist demnach nicht zulässig. In der Laborpraxis wurden die Proben aber z. T. direkt aus dem Big Bag in den Behälter geschüttet oder der Eimer gerüttelt bzw. aufgeschlagen damit der Schaumglasschotter etwas nachrutscht. Es wird daher festgelegt, dass die Proben, wie in der DIN 1097-3 beschrieben, einzufüllen sind. Dabei sollte eine genügend große Schaufel (ca. 3 l) verwendet werden. Wichtig ist dabei die gleichmäßige Einfüllung in den Prüfzylinder. Die Schaufel kann wegen der größeren Höhe des Messgefäßes auch zum Befüllen in den Behälter geführt werden. Keinesfalls darf der Schotter aus größerer Höhe eingefüllt werden.



Bild 7: Einfüllen in den Prüfzylinder und Wiegeschaufel.

An der Oberkante muss der Schaumglasschotter eine Ebene bilden damit das Referenzvolumen des Prüfeimers auch dem Volumen der Schüttung entspricht. Wegen der groben Körnung des Schaumglas muss hier eine genauere Definition gefunden werden. Wird der Schotter so eingefüllt, dass kein Korn übersteht, ist das Volumen nicht vollständig gefüllt. Werden alle Hohlräume aufgefüllt, wird eine zu große Menge gewogen. Daher muss per Hand die Körnung so gelegt werden, dass in etwa gleich viel über den Rand hinaussteht, wie Lücken vorhanden sind. Um den Einfluss dieses manuellen Verfahrens auf den Füllstand zu untersuchen, wurden Messungen an einer Charge durchgeführt. Bild 8 zeigt die untersuchten Füllstände und Tabelle 5 die jeweils ermittelte Schüttdichte. Die Schüttdichte variiert demnach um $\pm 2\%$ je nach Füllstand.



Bild 8: Untersuchte Füllstände, oben: Befüllung ohne Überstand, Mitte: ausgeglichene normale Befüllung, unten: überfüllt mit nahezu keinen Lücken.

Tabelle 5: Schüttdichte in Abhängigkeit des Füllstandes, gemessen an Material A.

| | Schüttdichte | Abweichung |
|--------------------------|-------------------|------------|
| | kg/m ³ | % |
| Befüllung ohne Überstand | 127,9 | -1,3 |
| Ausgeglichene Befüllung | 129,6 | - |
| Überfüllt | 130,8 | +0,9 |

Die Details der Messungen sind in der Tabelle 22 im Anhang aufgeführt. Für die weiteren Prüfungen wird eine »normale Befüllung« festgelegt (mittleres Verfahren): Es dürfen Körner überstehen, die Überstände sollen jedoch im Mittel den Hohlräumen an der Oberfläche entsprechen.

4.4 Vergleichsmessungen

Nach der Abstimmung der Verfahren wurde die Bestimmung der Schüttdichte wiederholt. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse zusammengefasst, die Details sind im Anhang in Tabelle 19 bis Tabelle 25 aufgeführt.

Tabelle 6: Ermittelte Schüttdichte nach der Abstimmung der Verfahren.

| | Schüttdichte | | | | |
|------------|-------------------------|---------|---------------------------|---------|-------------------|
| | Labor 1 | | Labor 2 | | Einheit |
| Material A | 137,9 138,4 142,2 | Ø 139,5 | 128,9; 132,9; 128,3 | Ø 130,0 | kg/m ³ |
| Material B | 134,5 134,9 136,3 | Ø 135,2 | 133,2 144,6 | Ø 138,9 | kg/m ³ |

Verglichen mit den ersten Messwerten sinkt bei Labor 1 die Schüttdichte, da der Messzylinder nun nicht mehr bei der Messung aufgeschlagen wird. Bei Labor 2, bei dem sich das Prüfverfahren im Grunde nicht geändert hat, sind die Werte für Material A nahezu gleich. Für Material B wird zum einen ein fast identischer Wert und bei einer zweiten Charge ein um 11,4 kg/m³ niedriger Wert gemessen. Die deutliche Streuung ist vermutlich der Inhomogenität des Schotters geschuldet. Beim Vergleich der Institute untereinander zeigt sich, dass einmal in Labor 2 und einmal im Labor 1 höhere Schüttdichten gemessen wurden. Da keine Tendenz zu erkennen ist, dass die Messungen in dem einen Labor systematisch höher oder niedriger sind, liegen die Unterschiede auch hier eher in der Inhomogenität des Materials als in dem Verfahren begründet. Um den Einfluss des Probenmaterials bzw. der verschiedenen Chargen auszuschließen, wurde eine identische Charge mit ca. 100 l in beiden Instituten bestimmt. Die Abweichung zwischen den gemessenen Schüttdichten lagen hier bei 1,6 % (Tabelle 7). Damit kann nachgewiesen werden, dass die Unterschiede in der gemessenen Schüttdichte im Wesentlichen in der Variabilität des Schotters begründet sind.

Tabelle 7: direkter Vergleich der neuen Methode an einer identischen Probe

| | Schüttdichte | | |
|------------------------|--------------|---------|-------------------|
| | Labor 1 | Labor 2 | Einheit |
| Material A | 134,4 | 132,2 | kg/m ³ |
| Differenz zum Messwert | 1,6 | | % |

Die Wiederholgenauigkeit wurde ferner durch einen laborinternen Vergleich von Mitarbeitern im Labor 2 untersucht. An zwei gleichen Chargen mit je ca. 200 l wurde die Schüttdichte von zwei Mitarbeitern bestimmt. Tabelle 8 zeigt, dass zwischen diesen Messungen Abweichungen von 1,8 % festgestellt wurden. Die Details der Messungen sind in Tabelle 26 im Anhang aufgeführt.

Tabelle 8: Bestimmung der Schüttdichte durch verschiedene Mitarbeiter im Labor 2 an zwei Chargen, Material A.

| | Charge 1 | Charge 2 | Einheit |
|---------------|----------|----------|-------------------|
| Mitarbeiter 1 | 131,2 | 132,9 | kg/m ³ |
| Mitarbeiter 2 | 128,9 | 135,3 | kg/m ³ |
| Differenz | +1,8 | -1,8 | % |

4.5 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Anhand der oben aufgeführten Messungen werden folgende Empfehlungen für eine genauere Prüfanweisung gegeben:

- Die Prüfung nach DIN EN 1097-3 kann beibehalten werden.
- Es sollten Prüfzylinder aus einem Rohr mit 300 mm Innendurchmesser und einer Höhe 600 mm verwendet werden.
- Die Schüttung sollte mit einer Schaufel in den Behälter gefüllt werden. Dabei soll die Probe nicht aus großer Höhe (50 mm über Messgefäßrand) eingefüllt werden. Die Schaufel darf zum Einfüllen in das Messgefäß geführt werden.
- Die Oberfläche soll eine möglichst gleichmäßige Ebene bilden. Die Lücken und die über den Rand hinausstehende Körner sollten sich in etwa ausgleichen.
- Es sind mindestens drei Messungen für ein Ergebnis durchzuführen.

Auf diese Weise ist eine Wiederholpräzession von 2 % zu erreichen.

Da die Proben nicht mehr durch Schütteln oder Aufklopfen des Prüfrahmens verdichtet werden, ist damit zu rechnen, dass die gemessenen Schüttdichten in einigen Fällen niedriger als bisher ausfallen. Diese Änderungen sollten bei der Klassifizierung oder beim Festlegen des Verdichtungs-faktors beim Einbau berücksichtigt werden.

5 Korngrößenverteilung

5.1 Ausgangssituation und Literatur

Die Korngrößenverteilung war bisher nicht Gegenstand der Fremdüberwachung auf nationaler Ebene. Daher liegen hier noch wenige Erfahrungen vor. In den Europäischen Zulassungen [21] werden z. T. Prüfungen der Korngrößenverteilung vorgesehen. Dabei wird überprüft, ob das Über- und Unterkorn eingehalten wird. Für die Reinheit der Körnung wird nach EAD 040394-00-1201 [24] für das Überkorn und Unterkorn 15 % als Grenze definiert (G85/15).

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung verweist die EAD 040394-00-1201 [24] auf die Prüfnorm DIN EN 933-1 [4] (Siebverfahren) mit der Einschränkung, dass die Siebung per Hand durchgeführt werden sollte, um Abrieb zu vermeiden. Für eine Prüfung sind ca. 20 l Material zu verwenden. Bei einer üblichen Schüttdichte von 120 bis 160 kg/m³ für Schaumglasschotter entspricht das 2,4 bis 3,6 kg Material. Gemäß DIN EN 933-1 Tabelle 1 soll bei einer Körnung bis 90 mm eine Mindestmenge von 80 kg gesiebt werden. Umgerechnet auf die 10 mal kleinere Dichte des Schaumglasschotters verglichen mit Gesteinskörnungen ergibt das eine Mindestmenge von 8 kg oder 40 l (bei angenommenen 200 kg/m³ Rohdichte).

In der Produktnorm für leichte Körnungen EN 13055 [11] wird festgelegt, dass die Korngrößenverteilung ohne vorheriges Waschen nach EN 933-1 bestimmt werden kann und es wird empfohlen »bei bröckeligen Gesteinskörnungen darauf zu achten, Kornzerkleinerung zu verhindern«.

Das Verfahren nach DIN EN 933-1 beinhaltet grundsätzlich, dass die Proben vorher gewaschen werden. Dieses Vorgehen ist bei Schaumglasschotter problematisch und eventuell unnötig. Der Schotter wird direkt aus der laufenden Produktion entnommen und ist nicht mit Bodenmaterial verschmutzt, das ausgewaschen werden müsste. Zudem nimmt die Körnung selber deutlich Wasser auf und ist aufwändig zu trocknen (ca. 5 Tage siehe Kapitel 3.3). Beim anschließenden Trocknen selber könnten Mikrorisse in der Körnung aufgesprengt werden, so dass die Korngrößenverteilung verändert wird. Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung wird daher empfohlen die Schüttung wie geliefert zu sieben. Die Probe wird dabei per Hand ausgesiebt. Rütteln des Siebes ist, besonders bei den großen Körnungen über 16 mm, zu vermeiden.

5.2 Durchgeführte Messungen

Die Sieblinie von drei Chargen des Materials B ist in Bild 9 und im Anhang Tabelle 27 aufgeführt. Der Anteil an Über- und Unterkorn (10 mm und 60 mm) liegt deutlich unter 15 %. Betrachtet man die Auswertung genauer, fällt auf, dass die Summe der Durchgänge in Bild 9 von 0 mm bis 10 mm bzw. 16 mm nahezu konstant ist.

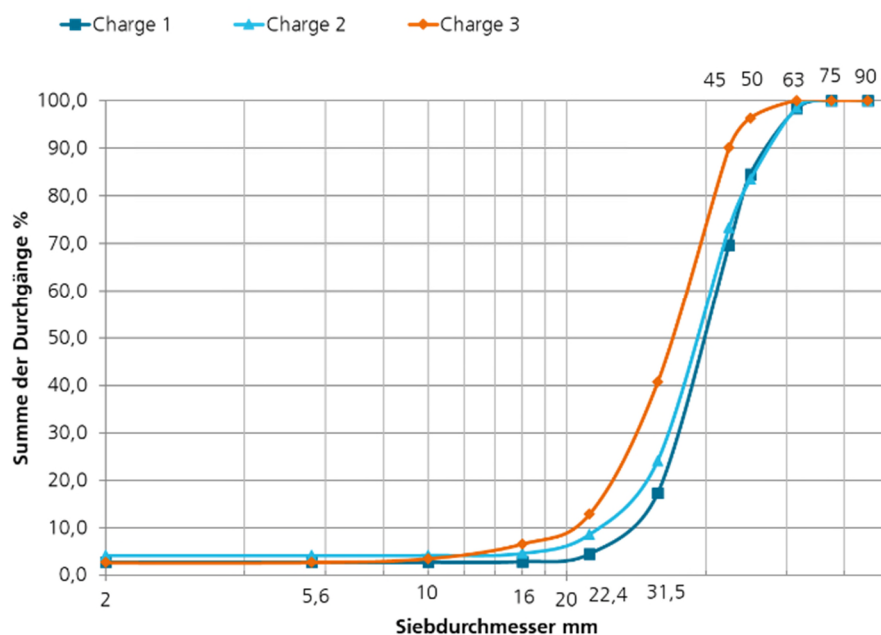


Bild 9: Korngrößenverteilung, drei Chargen Material B, Summe der Durchgänge.

In Bild 10 (Darstellung der Sieblinie als Anteil der Rückstände) wird deutlich, dass ein signifikanter Massenanteil (2 M.-% bis 5 M.-%) der Körnung kleiner als 2 mm ist. Es handelt sich dabei wie in 3.5 beschrieben um Sand, der durch Abrieb entsteht und sich in am Boden der Schüttung ansammelt. Da der Sand eine deutlich höhere Dichte als Schaumglas hat (Glasmehl 1000 -1500 kg/m³), ist dieser Anteil zwar massebezogen signifikant, aber volumenbezogen viel kleiner. Für die Anwendung als Schüttung unter der Bodenplatte oder als Drainageschicht ist dieser Anteil nicht wirksam. Da die Lieferung des Materials üblicherweise nach Volumen und nicht nach Masse erfolgt (Big Bag oder Container), spielt dieser Feinanteil auch keine Rolle bei der Abrechnung. Für die Auswertung wird daher empfohlen, den Sandanteil ab einer Körnung kleiner 1/10 des Kleinstkorn (z. B. 1 mm bei 10/60-Schüttungen) nicht zu berücksichtigen. Voraussetzung ist, dass, wie in dem Beispiel hier gezeigt, die Sieblinie unterbrochen ist. Also zwischen Sandanteil und eigentlicher Schüttung der Anteil des Rückstandes auf mindestens einem Sieb nahezu Null ist.

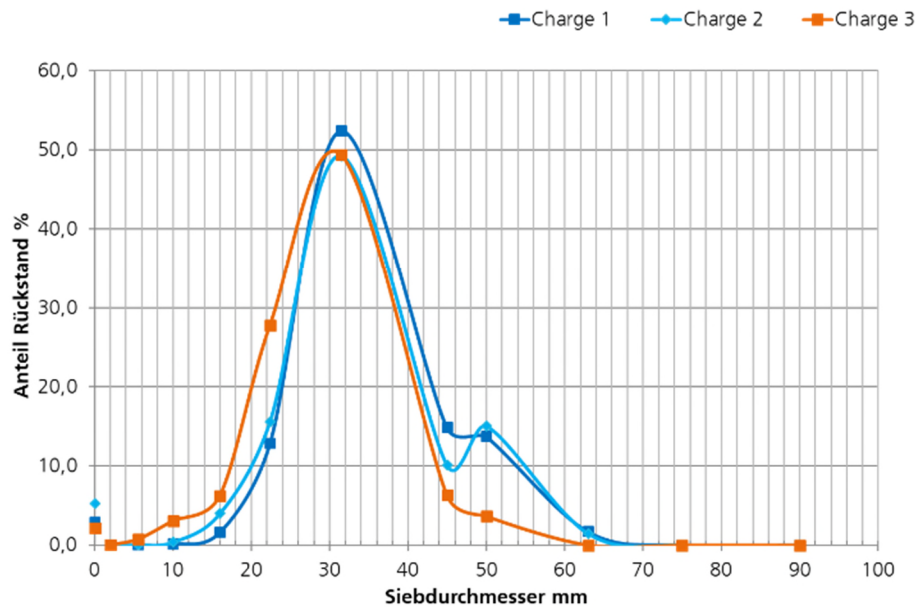


Bild 10: Korngrößenverteilung, drei Chargen Material B, Anteil der Rückstände.

5.3 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Anhand der oben aufgeführten Messungen werden folgende Empfehlungen für eine genauere Prüfanweisung gegeben:

- Siebung nach DIN EN 933-1
- Trockensiebung
- Mindestens 40 l Material sieben
- Siebung per Hand ohne Rüttelplatte
- Feinanteil unter 1/10 Kleinstkorn verwerfen

6 Rohdichte des gelieferten Vollmaterials

6.1 Ausgangssituation und Literatur

Zur Bestimmung der Rohdichte muss das Volumen der Schaumglaskörner möglichst genau gemessen werden. Die üblichen Verfahren zur Dichtebestimmung bzw. zur Volumenbestimmung von Schüttungen sind in DIN EN 1097-6 [6] beschrieben. Dort werden zwei Möglichkeiten erwähnt: Das Drahtkorbverfahren und das Pyknometer-Verfahren, bei denen das Messprinzip auf der Verdrängung einer Flüssigkeit durch eine Probe beruht.

Beim Drahtkorbverfahren wird die Probe mit einem Drahtkorb in Wasser eingetaucht und durch das verdrängte Wasser kann die Dichte der eingetauchten Probe bestimmt werden. Da die Schaumglaskörner leichter als Wasser sind schwimmen sie auf und lassen sich dadurch nicht einfach messen.

Das Pyknometer ist ein Glaskolben oder Metallzylinder mit dazugehörigem Schliffaufsatz. Bei diesem Verfahren kann durch Wägung des leeren und des gefüllten Pyknometers die Dichte der Befüllung errechnet werden. Für Schaumglas besteht die Schwierigkeit darin, ein geeignetes Pyknometer zu finden. Üblicherweise handelt es sich dabei um Glasbehälter mit relativ engem Hals oder kleinen Zylindern, in die größere Körnungen nicht hinein passen.

Für beiden Verfahren muss das Schaumglas vorher mit Paraffin oder ähnlichem wasserdicht versiegelt werden, da sich die Körner sonst mit Wasser vollsaugen und das Ergebnis verfälschen. Die Beschichtung mit Paraffin verändert das zu messende Volumen der Körnung und muss nachträglich abgezogen werden. Außerdem ist nicht klar, wie viel Paraffin in die Risse des Schaumglaskornes eindringt.

6.2 Alternativen

Eine Möglichkeit die Rohdichte zu bestimmen ist, die einzelnen Körner rechteckig zuzuschneiden und dann mit der Schieblehre auszumessen. Das Verfahren hat aber ebenfalls einige Nachteile: Die Körner brechen schnell beim Sägen und die Durchführung ist aufwändig. Zudem kann dann nur ein Teil des Kornes gemessen werden, nicht aber die Schäumungshaut, Randbereiche oder sehr ungleichförmige Körner.

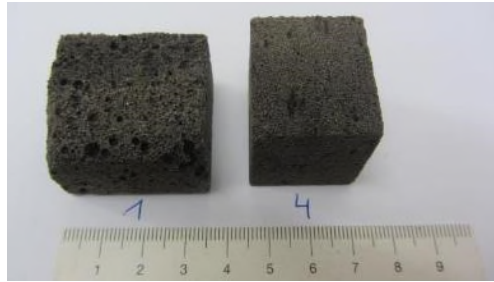


Bild 11: Beispiel zugeschnittene Schaumglaskörner zur Volumenbestimmung mit einer Schieblehre.

In der DIN EN 14315-2 [14] wird für die Volumenbestimmung ein Eintauchverfahren beschrieben (siehe Skizze unten). Dabei wird eine Probe in ein Wasserbecken getaucht und die Auftriebskraft gemessen. Bei diesem Verfahren muss allerdings, wie beim Pyknometer nach EIN 1097-6 die Probe wasserdicht umhüllt sein.

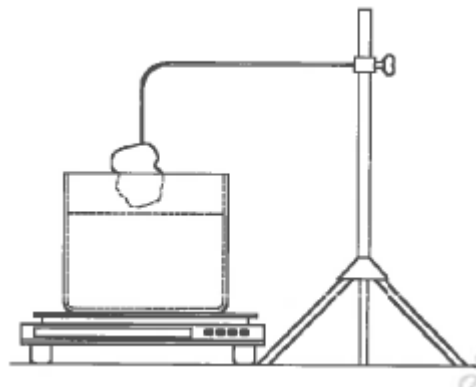


Bild 12: Eintauchverfahren nach DIN EN 14315-2, 2013-04.

Eine Alternative, bei der die Proben nicht verändert werden müssen ist das Sandersatzverfahren. Dieses ist in DIN 18125-2 [15] in Kapitel 7.3 beschrieben. Diese Norm aus dem Bereich der Baugrunduntersuchung beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der Dichte bzw. des Volumens des Bodens. Dabei wird ein Hohlraum im Boden mit einem Prüfsand gefüllt und die Masse des Sandes bestimmt. Über die bekannte Schüttdichte des Prüfsandes kann so das Volumen des ungleichförmigen Hohlraumes bestimmt werden. In gewisser Weise entspricht das dem Pyknometerverfahren, allerdings wird nicht Wasser, sondern Sand für die Volumenbestimmung verwendet.

Für die Laborversuche wurden als Prüfsand einheitliche Glaskugeln mit einem Durchmesser 1,0 bis 1,2 mm verwendet. Diese Kugeln haben einem normalen Sand gegenüber den Vorteil, dass die Schüttdichte konstanter ist und diese nicht in die Poren des Schaumglas eindringen. Durch den Durchmesser von 1 mm passen sich die Kugeln gut an die Struktur des Kornes an, ohne in die feinen Poren des Schaumglas einzudringen.

Für die Prüfung wird ein Laborglas, Zylinder, Becher oder ähnlicher Behälter verwendet. Voraussetzung ist, dass die Öffnung groß genug für die Körner ist und der Rand der Öffnung eben ist. Zunächst wird nach DIN EN 1097-3 [5] die Schüttdichte der Glaskugeln bestimmt. Dafür wird das Prüfgefäß vollständig mit den Glaskugeln gefüllt und die Oberfläche abgestreift, um dann die Masse des Behälters mit den Glaskugeln zu bestimmen.

Die Schaumglaskörner werden, wie in Bild 13 gezeigt, zunächst einzeln auf eine Schicht der Glaskugeln gelegt und dann der Rest des Behälters vollkommen mit Glaskugeln gefüllt. Die Oberfläche wird wieder mit einem Lineal abgestreift und die Masse bestimmt.



Bild 13: Volumenbestimmung im Sandersatzverfahren.

Aus der Massendifferenz der ersten Wägung des mit vollständig mit Glaskugeln gefüllten Messbechers und der zweiten Wägung des Messbechers mit Glaskugeln und Probe kann bestimmt werden, wie viel Glaskugeln durch die Probe verdrängt wurden. Über die vorher bestimmte Schüttdichte der Glaskugeln kann so das Volumen der Probe bestimmt werden. Dieses »Glaskugelverdrängungsverfahren« wurde im Ringversuch überprüft.

6.3 Validierung des Messverfahrens

6.3.1 Wiederholpräzision

Die Rohdichte wurde an jeweils fünf Körnern vom Material beider Hersteller bestimmt. Um die Wiederholpräzision zu prüfen, wurde jedes Korn dreimal hintereinander gemessen. Dabei zeigte sich, dass die Standardabweichung bei der Messung der gleichen Körner von der Größe des Kornes abhängig ist (siehe Bild 14). Je kleiner das Korn, desto geringer ist die Wiederholpräzession. Die Prüfung wurde in einem Behälter mit ca. 300 ml Volumen durchgeführt. Bei Körnern mit einer Größe kleiner 40 ml steigt die Abweichung bei Wiederholungsmessungen deutlich an. Bei kleineren Proben sind in dem Prüfgefäß anteilig mehr Glaskugeln vorhanden, wodurch Schwankungen in der Schüttdichte

der Glaskugeln einen größeren Einfluss haben. Daher sollten die Körner möglichst groß gewählt werden, bzw. für unterschiedlich große Körner sind verschieden große Prüfgefäße zu verwenden. Aus den Messungen ergibt sich die Empfehlung, dass das Verhältnis von Volumen der Körnung zum Prüfgefäß nicht kleiner als 0,15 sein sollte. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Körner noch genügend Abstand zum Rand des Messbechers haben. Der 10 fache Durchmesser der Glaskügelchen, also 10 mm, hat sich als ausreichend erwiesen.

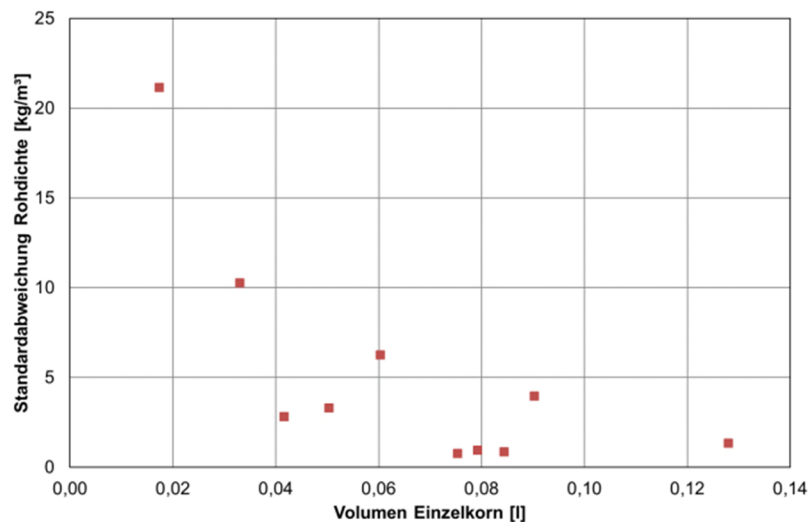


Bild 14: Zusammenhang Standardabweichung der Wiederholungsmessungen zu Volumen des Einzelkorns. Jedes Korn wurde 3 mal mit dem gleichen Verfahren gemessen.

6.3.2 Vergleich von Messungen in beiden Laboratorien

An einem Satz aus jeweils fünf Probekörnern von beiden Schaumglasschotterarten wurde die Rohdichte im Labor 1 und Labor 2 bestimmt. Die Proben wurden für den Versuch nach der Messung an das jeweils andere Labor geschickt. Dabei zeigte sich bei dem einen Material eine Übereinstimmung der gemessenen Rohdichte von 1 %, bei dem zweiten Material eine Differenz von über 10 %. Die größte Abweichung tritt hier auch wieder bei den sehr kleinen Körnern auf. Womit die größere Abweichung bei Material B zu begründen ist, konnte nicht geklärt werden. In Tabelle 28 und Tabelle 29 im Anhang sind die Details der Messungen aufgeführt.

6.3.3 Vergleich mit Pyknometer-Verfahren

Um das neue Glaskugelverdrängungsverfahren zu überprüfen, wurden Vergleiche mit den Pyknometer-Verfahren durchgeführt. Dafür wurde ein Satz von fünf Körnern so zugeschnitten, dass die Proben in ein zylindrisches Pyknometer mit 100 ml Volumen passen. Die Körner wurden zunächst mit dem neuen Glaskugelverdrängungsverfahren vermessen. Danach wurden die gleichen Körner mit einer dünnen Schicht Paraffin umhüllt und anschließend im Pyknometer

vermessen. Bild 15 zeigt die Schaumglasschotterprobe im zylindrischen Pyknometer. In der Tabelle 30 (Anhang) ist die Übersicht der Messergebnisse der fünf Proben jeweils mit dem Glaskugelverdrängungsverfahren und dem Pyknometer-Verfahren aufgeführt.



Bild 15: Zylindrische Pyknometer mit Schaumglasschotter Probe.

Bei den Messungen ergibt sich eine Abweichung der Rohdichte von im Mittel 3 %, bei einzelnen Werten bis zu 6 %. Die Messungen mit dem Pyknometer ergaben grundsätzlich etwas niedrigere Rohdichten, als das Glaskugelverdrängungsverfahren. Ursache für diese systematische Abweichung könnte die Oberflächenstruktur der Schaumglasproben sein, da sich die Glaskugeln und das Paraffin bzw. Wasser unterschiedlich gut an die Oberfläche anpassen.

6.4 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Das Glaskugelverdrängungsverfahren ist eine einfache und auch in der Produktionskontrolle praktikable Testmethode. Es ermöglicht die Messung von unterschiedlich großen Körnern ohne dass weitere Vorbereitungsschritte (Zuschneiden oder mit Paraffin umhüllen) notwendig sind. Die Genauigkeit ist allerdings nicht so gut wie beim Pyknometer-Verfahren. Je nachdem wie die Glaskugeln eingefüllt werden, ändert sich die Schüttdichte der Kugeln. Außerdem kann beim Abstreifen der Kugeln an der Oberfläche das Gefüge verändert werden. Dadurch kommt es bei im Verhältnis zum Prüfgefäß, kleinen Körnern zu stärkeren Schwankungen im Messergebnis. Bei der Auswahl des Prüfgefäßes muss daher drauf geachtet werden, dass dieses der Größe der zu prüfenden Körner angepasst ist.

Für die Fremdüberwachung sollte das Pyknometer- oder Drahtkorbverfahren nach DIN EN 1097-6 [6] in Kombination mit der Paraffinbeschichtung verwendet werden. Dieses liefert über einen weiten Bereich von Korngrößen zuverlässigere Werte.

Empfehlungen für die Bestimmung der Rohdichte mit dem Pyknometer:

- Die Körner sollten mit Paraffin umhüllt werden.
- Für die Messung ist ein geeignetes Pyknometer mit großer Öffnung (> 30 mm) zu verwenden.

In der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) kann das Sandersatzverfahren eingesetzt werden, um in der laufenden Produktion schnell Ergebnisse zu erhalten. Dabei sollte Folgendes beachtet werden:

- Als Prüfsand Glaskugeln mit gleichmäßigem Durchmesser von ca. 1 mm verwenden.
- Den Prüfbehälter an die Korngröße anpassen:
 - ca. 10 mm Abstand an den Seiten zwischen Korn und Prüfbehälter,
 - maximal 15 mal das Volumen des gemessenen Kornes

7 Druckspannung bei 10 % Stauchung

7.1 Ausgangssituation und Literatur

Die Messung der Druckspannung erfolgt nach der Prüfnorm DIN EN 826 [2]. Diese Norm wurde grundsätzlich für Dämmstoffe entwickelt. Im Regelfall wird dabei an plattenförmigen Dämmstoffen die Druckspannung bis zu einer Verformung von 10 % Stauchung des Probekörpers gemessen. In der EN 826 [2] sind keine Angaben für die Messung von Schüttungen vorhanden. Schaumglasschotter wird zwar als Dämmstoff eingesetzt, ist von der Materialart aber eine Schüttung aus leichter Gesteinskörnung. Für solche Baustoffe könnte auch eine Prüfung nach EN 13055 [11] durchgeführt werden. Diese Norm beinhaltet eine Prüfung der Kornfestigkeit. Der grundsätzliche Unterschied von Schaumglasschotter zu den Zuschlagsstoffen dieser Norm ist, dass dieser ohne Beton oder Asphalt eingesetzt wird. Das Traggerüst der Schüttung besteht nur aus Schaumglasschotter. Daher ist die Kornform und -größe wichtig für die Festigkeit der verdichteten Schüttung. In EN 13055 [11] wird für die Kornfestigkeitsprüfung dagegen ein kleiner Prüfrahm verwendet (113 mm Durchmesser) und es wird die Körnung nur bis 22 mm geprüft. Körnung, die größer ist, muss im Labor entsprechend zerkleinert werden. Damit ist das Prüfergebn stark abhängig von der Art der Aufbereitung. Die EN 13055 erscheint hier als nicht praxistauglich für Schaumglasschotter mit Nennkorngrößen von 60 bis 80 mm Größtkorn.

Da die EN 826 [2] keine Angaben zur Prüfung von Schüttungen enthält, wurden in den nationalen Zulassungen, z. B. [18] bis [20], ergänzende Angaben gemacht. Die Prüfung ist in einem Prüfrahm mit quadratischer Grundfläche von 200 mm x 200 mm und der Höhe von 170 mm durchzuführen. Die Proben werden für die Prüfung, entsprechend dem Einbau unter der Bodenplatte, auf ein Verhältnis von 1,0:1,3 verdichtet (entspricht einer Verdichtung um 23,1 %). Danach wird die Druckspannung bei 10 % Stauchung gemessen. Die 10 % Stauchung bezieht sich auf die Probenhöhe nach der Verdichtung. In der EAD [24] wird dieses Vorgehen übernommen, wobei der Prüfrahm nicht genauer definiert ist und die Probe um das für das jeweilige Material angepasste Verdichtungsverhältnis vorverdichtet werden soll.

Die Vorgaben der nationalen Zulassung wurden in unterschiedlicher Weise interpretiert. Zum einen wurde der Probekörper mit einer Höhe von 170 mm nach der Verdichtung hergestellt oder der Probekörper wurde von 170 mm auf 1,0:1,3 verdichtet und dann die Stauchung auf 10 % geprüft (siehe dazu Skizzen in Bild 16 und Bild 17). Zum anderen wurde die Füllmenge unterschiedlich bestimmt. Entweder wurde vor der Druckprüfung an einer größeren Menge die Schüttdichte der Körnung bestimmt und dann die Masse für die Einfüllmenge der Druckspannungsmessung gewogen (Massenmethode), oder im anderen Fall der Prüfrahm, welcher im Verhältnis 1,0:1,3 höher als die Probe ist, mit Schaumglasschotter gefüllt und dann auf 1,0 verdichtet (Volumenmethode).

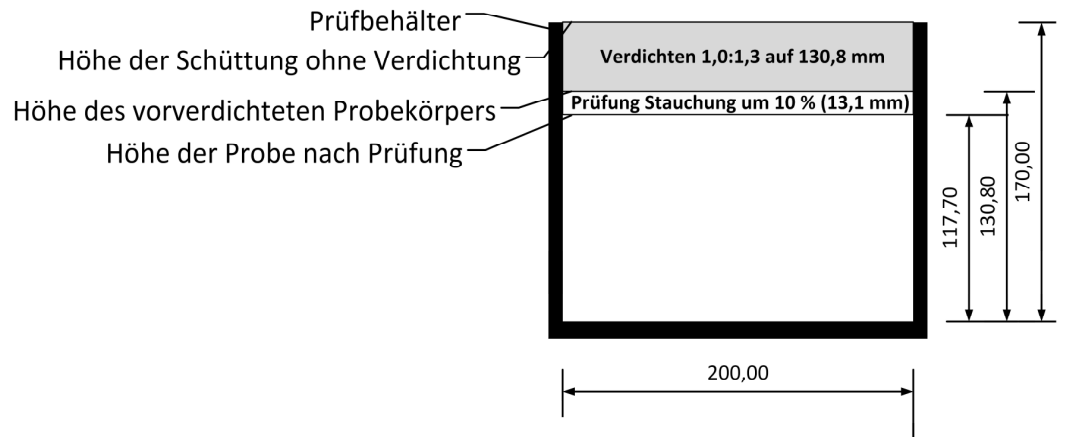


Bild 16: Skizze Füllhöhe und Kompressionsweg im rechteckiger Prüfraumen mit Probenhöhe 170 mm, unverdichtet.

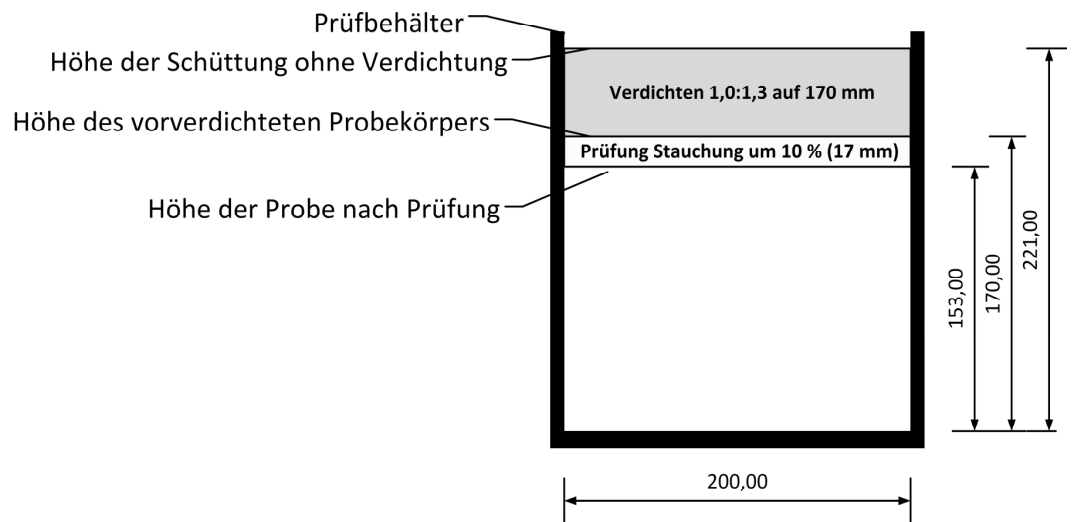


Bild 17: Skizze Füllhöhe und Kompressionsweg im rechteckiger Prüfraumen mit Probenhöhe 170 mm, vorverdichtet.

Da unklar war, ob es bei diesen Unterschieden in der Vorbereitung und Prüfungsdurchführung zu abweichenden Ergebnissen kommt, wurden zunächst vergleichende Messungen am Schaumglasschotter durchgeführt. Das Labor 2 verwendete den höheren und das Labor 1 den niedrigeren Prüfraumen. In beiden Fällen wurde die Schüttdichte vor der Prüfung am Schaumglasschotter bestimmt und dann eingewogen (Massenmethode).

Tabelle 9: mittlere Druckspannung nach DIN EN 826 in verschiedenen Prüfra-
men.

| | Mittlere Druckspannung bei 10 % Stauchung und Einbaudichte des Materials | | | |
|------------|---|-------------------------|--|-------------------------|
| | Labor 1 Prüfkörperhöhe 131 mm verdichtet | | Labor 2 Prüfkörper 170 mm verdichtet | |
| Material A | 474 kPa | 186,3 kg/m ³ | 471 kPa | 169,3 kg/m ³ |
| Material B | 492 kPa | 182,2 kg/m ³ | 590 kPa | 188,0 kg/m ³ |

Für Material des Herstellers A lagen die Werte sehr nahe beieinander (nur 3 kPa Differenz). Dabei ist aber zu beachten, dass beim Labor 2 eine geringere Einbaudichte (17,0 kg/m³) verwendet wurde. Bei Material des Herstellers B lag die Differenz zwischen den Messergebnissen bei 98 kPa bei ähnlicher Einbaudichte (beim Labor 2 5,8 kg/m³ höher). Anscheinend führen die Messungen in dem höheren Probekörper (Labor 2) zu größeren Druckspannungen. Die Einzelergebnisse zu den Prüfungen sind im Anhang in Tabelle 31 bis Tabelle 34 aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass die einzelnen Messwerte innerhalb von einer Serie um 153 kPa schwanken (Material B).

7.2 Anpassungen

Bei der Durchführung der Druckspannungsprüfung im Labor zeigte sich, dass der quadratische Prüfra-
men nicht ideal ist: Beim Einfüllen des Schaum-
glasschotters kommt es oft vor, dass aufgrund der groben und inhomogenen
Körnung die Ecken des Prüfra-
mens nicht richtig mit Probematerial ausgefüllt
sind. Dann hängt es vom Prüfer ab, wie die Schüttung eingefüllt wird und ob
diese Lücken noch per Hand gefüllt werden. Bei anderen Prüfnormen, die mit
Körnungen oder Korngemischen arbeiten (z. B. EN13055 [11] Leichtzuschläge,
oder DIN 18127 [16] Proctorversuch), werden in der Regel zylinderförmige Prüf-
rahmen verwendet. Daher wurde für einen weiteren Ringversuch ein zylindri-
scher Prüfra-
men gewählt. Die Abmessungen sind ein Innendurchmesser von
250 mm und eine Höhe von 170 mm für die verdichtete Probe. Damit werden
die Vorgaben aus der DIN 18127 [16] und den bisherigen nationalen Zulassun-
gen berücksichtigt. Durch den größeren Durchmesser der Probe sollte die
Streuung der Messergebnisse abnehmen, da ein größerer Querschnitt an Kör-
nern gleichzeitig geprüft wird. Der Zylinder ist aus einem Standard-Rundrohr
mit einer Wandstärke von 8 mm ausgeführt. Die Bodenplatte ist fest ver-
schweißt und die Druckplatte aus 10 mm Stahl hat einen Durchmesser von
248 mm also 2 mm Spiel zum Prüfra-
men. In der Skizze in Bild 18 sind die Ab-
messungen des Prüfra-
mens dargestellt und in Bild 19 der fertige Prüfra-
men.

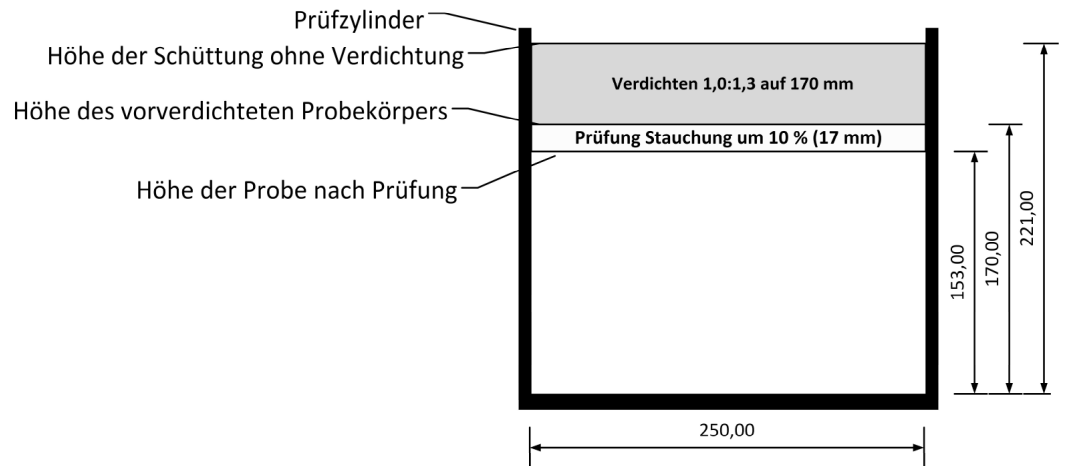


Bild 18: Skizze zylindrischer Prüfrahen: Innendurchmesser 250 mm.



Bild 19: Zylindrischer Prüfrahen für Druckspannungsmessungen nach DIN EN 826.

Mit dem neuen Prüfrahen wurde nun wiederum eine vergleichende Messung der Druckspannung bei 10 % Stauchung durchgeführt. In beiden Laboren wurden beide Proben geprüft. Die Ergebnisse in Tabelle 10 zeigen im Vergleich zu den Ausgangswerten in Tabelle 9 einige Unterschiede. Für beide Proben ergeben sich beim Labor 2 jeweils geringere Druckspannungswerte (Material A -50 kPa; Material B -26 kPa). Beim Labor 1 liegen beide Messwerte über den vorher gemessenen Werten (Material A + 60 kPa, Material B + 33 kPa). Wenn

vorher beide Messwerte beim Labor 2 über denen vom Labor 1 lagen, so sind nun die Werte ausgeglichener und korrelieren mehr mit der Einbaudichte. Beim Material A wird im Labor 1 im Vergleich zum Labor 2 bei der deutlich höheren Schüttdichte auch eine deutlich höhere Druckspannung gemessen. Beim Material B wurde beim Labor 2 die größere Druckspannung gemessen und auch die größere Einbaudichte verwendet.

Tabelle 10: mittlere Druckspannung nach DIN EN 826, geprüft im zylindrischen Prüfraumen

| | Mittlere Druckspannung bei 10 % Stauchung und Einbaudichte des Materials | | | |
|------------|---|-------------------------|---------|-------------------------|
| | Labor 1 | | Labor 2 | |
| Material A | 534 kPa | 185,8 kg/m ³ | 421 kPa | 172,1 kg/m ³ |
| Material B | 525 kPa | 182,3 kg/m ³ | 568 kPa | 188,0 kg/m ³ |

Auffallend ist, dass durch den neuen Prüfraumen die Druckspannungswerte beim Labor 2 kleiner werden, beim Labor 1 jedoch größere Druckspannungen gemessen werden. Die Steigerung bzw. Reduktion ist aber bei den beiden Materialien nicht gleichgroß, so dass der genaue Einfluss des Prüfraumens nicht eindeutig ist. Zudem wurde bei jeder Probe eine etwas andere Einbaudichte verwendet, je nach vorher bestimmter Schüttdichte der Charge. Daher wurde ein weiterer Versuch durchgeführt, um den Einfluss des neuen Prüfraumens festzustellen. Im Labor 2 wurden abwechselnd Prüfungen in dem zylindrischen und dem quadratischen Prüfraumen durchgeführt. Dabei wurde aus der gleichen Charge Material jeweils abwechselnd der quadratische und der zylindrische Prüfraumen gefüllt, so dass möglichst ähnliches Material mit der gleichen Schüttdichte geprüft wurde. Die Einfüllhöhen waren dabei jeweils gleich hoch (170 mm verdichtet). Hier zeigte sich, dass die Druckspannung, die im größeren, runden Prüfraumen gemessen wurde, durchgehend kleiner war, als in dem quadratischen Prüfraumen. In der Tabelle sind neben den Messwerten auch noch die Standardabweichungen von den 5 Einzelmessungen aufgeführt. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der einzelnen Messergebnisse um den Mittelwert. Es zeigt sich, dass der größere, runde Prüfraumen bei Material A zu kleineren, bei Material B aber wiederum zu größeren Streuungen der Einzelwerte (zumindest bis 20 % Stauchung) verglichen mit dem quadratischen Prüfraumen führte.

Tabelle 11: mittlere Druckspannung nach DIN EN 826 bei 10 %, 20 %, und 25 %; Stauchung, Vergleich zwischen quadratischem und zylindrischen Prüfrahmen an beiden Materialtypen, Labor 2.

| Material/Stauchung | | Quadratisch Innen 200 mm | | Zylindrisch Innen Ø 250 mm | | Ein- heit |
|--------------------|------|------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|
| | | Mittl. Druck- spannung | St.abwei- chung | Mittl. Druck- spannung | St.abwei- chung | |
| Material A | 10 % | 437 | 31 | 412 | 12 | kPa |
| | 20 % | 627 | 32 | 594 | 21 | kPa |
| | 25 % | 717 | 46 | 701 | 32 | kPa |
| Material B | 10 % | 489 | 10 | 465 | 45 | kPa |
| | 20 % | 689 | 24 | 670 | 41 | kPa |
| | 25 % | 790 | 32 | 772 | 29 | kPa |

Einbaudichte bei beiden Prüfrahmen gleich:
Material A: 166,8 kg/m³, Material B: 173,3 kg/m³

Die bisherigen Ergebnisse der Druckspannungsmessungen ergaben kein klares Bild für die Messunsicherheit beim Vergleich zwischen den Laboratorien. Durch die unterschiedlichen Einbaudichten der Materialien überlagert sich der Einfluss des Prüfrahmens auf die Ergebnisse. Allerdings führt der größere, runde Prüfrahmen zu einer Annäherung der Messergebnisse. Beim Labor 2 führt der Umstieg auf den runden Prüfrahmen zu kleineren, beim Labor 1 zu größeren Druckspannungen. Wobei beim Labor 1 auch die Höhe des Prüfrahmens verändert wurde, im Gegensatz zum alten Prüfrahmen des Labors 2. Ein Teil der Abweichungen ist sicher auch in der Inhomogenität des Schaumglasschotters begründet. Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, schwanken die Messwerte für die Schüttdichte innerhalb von einer Probe merklich. Die gemessene Druckspannung hängt direkt von der Verdichtung bzw. Einfüllmenge in den Prüfrahmen ab. Somit hat bereits die Varianz der Schüttdichte innerhalb der Messprobe einen Einfluss auf das Messergebnis der Druckspannungsmessung.

In Bild 20 ist für die bisher gezeigten Druckspannungsmesswerte beider Materialien zusammen die Abhängigkeit der Druckspannung von der Schüttdichte aufgetragen. Der verwendete Prüfrahmen ist farblich markiert. Aus der Darstellung ist der Zusammenhang von Einbaudichte und Druckspannung zu erkennen. Die gemessene Druckspannung steigt grundsätzlich mit zunehmender Einbaudichte an. Für den verwendeten Prüfrahmen ist der Zusammenhang nicht eindeutig. Für diese Ergebnisse lassen sich zwei Erklärungen finden.

Zum einen führt die größere runde Messfläche des Zylinders dazu, dass sich im Gefüge weniger »Brücken« zwischen den Körnern bilden. Dadurch sinkt insgesamt die gemessene Druckspannung. Dieses Verhalten würde aber auch eher den realen Einbaubedingungen entsprechen, bei der die Schüttung weitflächig

eingebaut wird. Das würde erklären, warum die Druckspannungsmessungen beim Labor 2 zu kleineren Messwerten für die Druckspannung führen. Zum anderen wird bei dem neuen höheren Prüfraumen zwar die gleiche relative Verdichtung durchgeführt, der absolute Weg bei der Prüfung ist aber länger. Es ist denkbar, dass die Verdichtung nicht ganz gleichmäßig über den Längsschnitt der Probe verläuft, sondern sich zunächst an den Auflagerflächen stärker staucht. Die Körner werden bei der Prüfung mehrfach gebrochen und umgelagert. Je nach Verhältnis von Kornfestigkeit und Reibungswinkel in der Probe ändert sich die gemessene Druckspannung. Anhand der Ergebnisse bei 10 %, 20 %, 25 % ist zu erkennen, dass hier kein linearer Zusammenhang zwischen Verdichtung und Kraft vorliegt, sondern mit stärkerer Verdichtung die Kraft immer schneller zunimmt. So kann bei einem absolut längeren Prüfweg die gemessene Druckspannung höher sein, wenn an den Oberflächen schon eine Schicht stärker umgeformt ist als bei der Schüttung. Dies würde die Zunahme der gemessenen Druckspannung beim Labor 1 im Vergleich von großem und kleinen Prüfraumen erklären. Da der Schotter in der Baupraxis meist mit größeren Schichtdicken als 130 mm eingebaut wird, würde diese Prüfung eher den realen Bedingungen entsprechen.

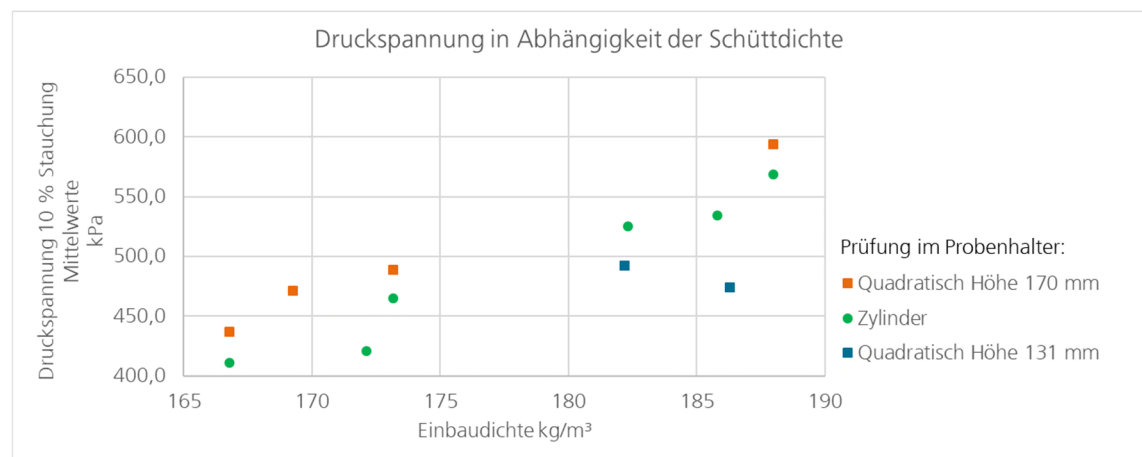


Bild 20: X-Y Plot, gemessene mittlere Druckspannung in Abhängigkeit der Einbaudichte und des verwendeten Prüfraumens.

Um zu überprüfen, ob bei der Messung ein systematischer Unterschied zwischen den Laboren vorhanden ist, wurde ein Vergleich mit einem homogeneren Material durchgeführt. Dazu wurde Schaumglasschotter mit einer Nennkorngröße von 5/8 mm beschafft. Das Material wurde gemäß Kapitel 3.5 vom Sand kleiner 2 mm befreit und in zwei Chargen mit je 300 l auf die beiden Labore verteilt. In den Laboren wurde dann die Schüttdichte bestimmt und die Druckspannung nach DIN EN 826 im zylindrischen Prüfraumen gemessen. Die Ergebnisse in Tabelle 12 zeigen, dass die Messwerte für Schüttdichte und Druckspannung nur um 2,6 % bzw. 3,1 % voneinander abweichen.

Tabelle 12: Schüttdichte und mittlere Druckspannung nach DIN EN 826 an Schaumglas mit Körnung 5/8 mm, Prüfung im zylindrischen Prüfraumen. Vergleich zwischen den beiden Laboren.

| | Labor 1 | Labor 2 | Einheit |
|---------------------------------|---------|---------|-------------------|
| Schüttdichte | 172,6 | 168,0 | kg/m ³ |
| Druckspannung 10 % Stauchung | 319 | 309 | kPa |

Das Ergebnis zeigt somit, dass die Messmethoden grundsätzlich gleich umgesetzt werden. Die Differenzen werden eher durch das Material verursacht. Ein Unterschied zwischen der Schüttung mit enger Körnung (5/8) und dem normalen, groben, Schaumglasschotter ist in dem Kraft-Weg Diagramm in Bild 21 aufgeführt. In dem Diagramm wird dargestellt, wie bei zunehmender Stauchung die Druckspannung zunimmt. Es sind Daten für eine Prüfung mit Schaumglasschotter vom Hersteller A und für eine Prüfung des Schaumglasschotters mit feiner Körnung (5/8) dargestellt. Geprüft wurde jeweils im zylindrischen Prüfraumen. An dem Verlauf der Kurven kann man gut erkennen, dass die feine Körnung einen deutlich »ruhigeren« Verlauf zeigt. Das grobe Schaumglas wird bei der Prüfung mehrfach gebrochen, was man bei der Prüfung akustisch wahrnehmen kann und hier auch in den Spannungsabfällen erkennbar ist. Diese Umformungen treten über dem ganzen Spannungsverlauf auf. Dadurch werden auch die Endergebnisse der Druckspannungsmessung ungleichmäßiger.

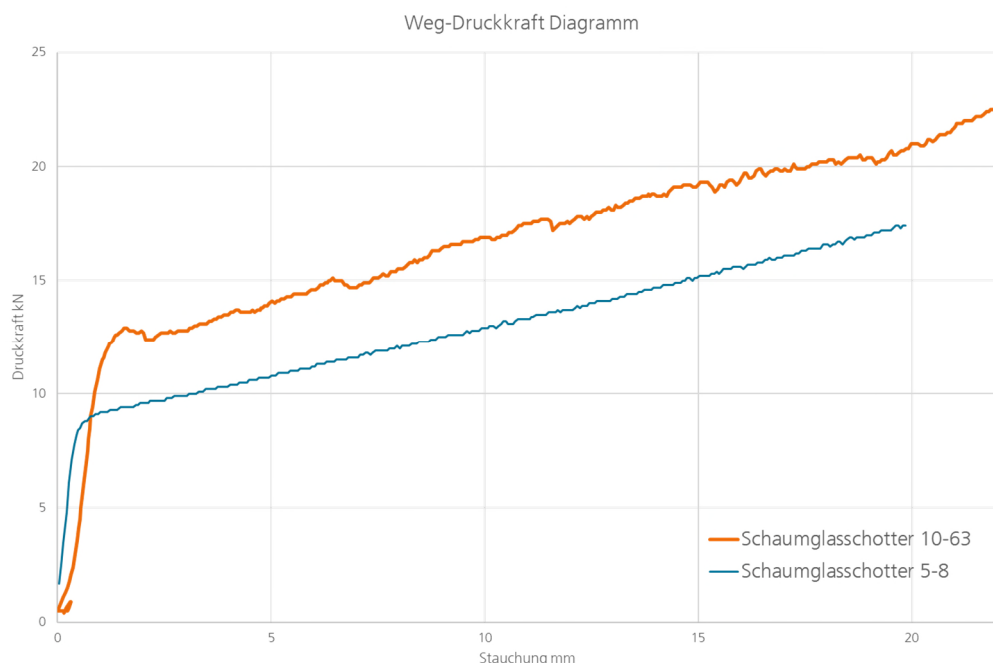


Bild 21: Weg-Druckkraft-Diagramm für Schaumglasschotter mit feiner Körnung (5/8) und Material A.

7.3 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Durch die Einführung eines größeren Prüfrahmens wurde eine bessere Übereinstimmung der Druckspannungsmessungen zwischen den Laboren und mit der verwendeten Einbaudichte erreicht. Durch diese Anpassung wurden die Messergebnisse folgendermaßen beeinflusst: Beim Labor 2 führten vergleichende Druckspannungsmessungen zwischen rundem und quadratischem Prüfrahmen zu geringeren Druckspannungswerten, beim Labor 1 war der Befund entgegengesetzt. Da die Schüttungen in der Baupraxis üblicherweise dicker als 130 mm ausgeführt werden, sollte in Zukunft auch ein höherer Prüfrahmen verwendet werden. Auch sollte die Messfläche größer sein, um die Kraftverhältnisse in der realen Schüttung besser abzubilden.

Das Prüfverfahren wurde auch anhand von Messungen an einer Schaumglasschotterschüttung mit kleinerer und gleichmäßigerer Körnung validiert. Dabei wurde eine Übereinstimmung von 3,1 % der Druckspannung erreicht. Wobei innerhalb einer Charge die Einzelwerte deutlich stärker variierten.

Die gemessenen Druckspannungen waren direkt von der vorherbestimmten Schüttdichte abhängig. Daher spielt die Überprüfung der Schüttdichte vor der Druckspannungsmessung eine entscheidende Rolle.

Empfehlungen für die Messung der Druckspannung bei 10 % Stauchung:

- Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an EN 826.
- Einführen eines neuen Prüfrahmens, rund, mit 250 mm Durchmesser, Höhe von 220 bis 230 mm .
- Um die Schwankungen innerhalb der Chargen zu berücksichtigen, muss vor der Prüfung an der entsprechenden Charge die Schüttdichte bestimmt werden.
- Die Einfüllmasse wird vor der Prüfung anhand der Schüttdichte berechnet.
- Vorverdichtung der Proben erfolgt um 1,0:1,3 auf 170 mm Höhe im Prüfrahmen.
- Anschließend erfolgt die Prüfung mit 10 % Stauchung (17 mm Weg).

Durch den veränderten Prüfrahmen ist mit veränderten Messergebnissen zu rechnen. Daher müssten die Grenzwerte in den Zulassungen nach einer Erstprüfung ggf. angepasst werden.

8 Wärmeleitfähigkeit in trockenem und feuchtem Zustand

8.1 Ausgangssituation und Literatur

Grundlage der Messung der Wärmeleitfähigkeit bildet die DIN EN 12667 [10]. Dort sind die allgemeinen Prüfverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, auch von Schüttungen, beschrieben. Laut dieser Norm sind sowohl das Verfahren mit Plattengeräten (Guarded Hot Plate, kurz GHP) als auch die Messung mit Wärmestrommessplattengeräten (Heat Flow Meter, kurz HFM) zulässig. Weitere Anforderungen an die Messung der Wärmeleitfähigkeit sind in den Zulassungen, z. B. [18] oder [19], der EOTA/EAD [24] und ETAs, z. B. [22], definiert. Dabei wird die Vorbehandlung, Mindestgröße des Prüfrahmens und die Einfüllmenge für den Prüfrahm genauer beschrieben.

Gemäß der Prüfnorm EN 12667 [10] sollte für Schüttgüter bzw. lose Füllstoffe eine Probekörperdicke von mindestens 10 mal dem Mittelkorn verwendet werden. Schaumglasschotter wird üblicherweise in einer groben Körnung eingesetzt, so bedeutet eine Körnung 10/60, dass das mittlere Korn 30 mm groß ist. Für die Probekörper wären dann Dicken von 30 cm und mehr nötig. Probekörper in der Größe wären schwierig zu handhaben und es gibt nur wenige Plattengeräte, die diese Dicke messen könnten. In den aktuellen Zulassungen z. B. [18] oder [19], wird für die Probekörper gefordert, dass die Dicke zwischen 100 mm und 200 mm liegen soll. Außerdem sollte die Abmessung 800 mm x 800 mm betragen. Nach der EAD vom Januar 2018 [24] muss der Prüfkörper Abmessungen von mindestens 500 mm x 500 mm x 100 mm besitzen. In den aktuellen ETAs und Prüfplänen zu den ETAs sind keine weiteren Anforderungen an die Probekörper gestellt. In allen Dokumenten wird eine Messfläche von mindestens 500 mm x 500 mm für das Plattengerät gefordert.

Prinzipiell sollten für die Untersuchungen zur Unterwasserlagerung die gleichen Prüfrahmen wie auch für die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand verwendet werden können. Andernfalls müssten die Proben vor der Wärmeleitfähigkeitsmessung umgefüllt werden. Allerdings hat sich in der Laborpraxis gezeigt, dass es mit großen Prüfrahmen mit einer Grundfläche von 800 mm x 800 mm nicht möglich ist, die Unterwasserlagerung durchzuführen, da die Prüfrahmen aufgrund des hohen Gewichts instabil werden. Für die Vergleichbarkeit wäre es jedoch besser, wenn die Proben zwischen den Messungen nicht umgefüllt werden müssen. Da die beiden Labore bisher unterschiedlich große Prüfrahmen verwendet haben, wurde vereinbart einen neuen Prüfrahm zu definieren, der die oben genannten Anforderungen möglichst gut erfüllt.

Für die Probenkonditionierung sind in den Zulassungen keine Anforderungen gestellt. In der EAD [24] wird allerdings gefordert, dass die Proben bei $110 \pm 5^\circ\text{C}$ getrocknet werden sollen. Da Schaumglas nur sehr wenig Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt, siehe Kapitel 3.3, scheint es fraglich, ob eine Trocknung für die Messungen notwendig ist. Für eine bessere Wiederholbarkeit ist es allerdings sinnvoll, die Proben grundsätzlich zu trocknen. Material, das mit Niederschlag in Berührung gekommen ist, muss auf jeden Fall getrocknet werden.

Für den Einbau der Proben ist vorgesehen, dass die Schüttung mit der gleichen Einbaudichte wie auch im Endzustand gemessen wird. Die Schüttdichte muss also vorher bestimmt und dann das Volumen um den Faktor 1,0:1,3 verkleinert (verdichtet) werden.

8.2 Bisheriges Vorgehen bei der Messung

Die Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit werden am Labor 1 mit einem HFM Gerät, am Labor 2 mit einem GHP Gerät durchgeführt. In beiden Fällen wurde die Probe nach der Bestimmung der Schüttdichte komprimiert in die Prüfraumen eingebaut. An dem Boden der Prüfraumen werden vorher die Thermolemente fixiert. Danach wird der Prüfraumen mit der Masse an Schaumglasgranulat befüllt, das der komprimierten Dichte entspricht (Bild 23). Die Probe wird mittels eines großen Hammers mit sanften Stößen und mittels eines Holzbrettes verdichtet. Damit ist die Probe vorbereitet und kann in das Plattengerät eingebaut werden. Die Oberfläche der Schüttung wird mit einer Kunststoffolie abgedeckt und die Thermolemente werden dann auf der Folie fixiert und dabei gezielt auf den Schaumglasschotter-Bruchstücke positioniert.



Bild 22: Verdichtung der Schüttung im Prüfraumen.

Beim Labor 2 wird dann noch eine Ausgleichsmatte aus ca. 2 mm Silikon-schaum oder Moosgummi zwischen Probe und Heizplatte gelegt. Diese gewährleistet einen guten Übergang von der Probe auf die Heizplatte. Beim HFM ist diese Ausgleichsschicht nicht unbedingt notwendig wenn der Wärmestrom-messer eine flexible Oberfläche hat. Der Prüfraumen wird, falls dieser kleiner als die Heizplatte ist, mit Dämmung aus EPS oder Korkschröt umgeben.



Bild 23: links: Einbau Prüfraumen im Plattengerät, rechts: Positionierung der Thermoelemente.

Die Messung im Plattengerät erfolgt im horizontalen Einbau, wobei die Heizplatte oben und die Kaltseite unten liegt. So ist der Wärmestrom, wie bei der Anwendung als Dämmung unter der Bodenplatte, von oben nach unten gerichtet. Die so bestimmten Messwerte haben daher nur Gültigkeit für Anwendungen, bei denen der Wärmestrom in die gleiche Richtung geht. Die Luftspalten zwischen den Körnern sind unterschiedlich groß und durchgehend miteinander verbunden. Es liegt hier also eher eine ruhende Luftschicht, als geschlossene »Poren« vor. Entsprechend ist gemäß Tabelle 8 in DIN EN ISO 6946 [17] davon auszugehen, dass die Wärmeleitfähigkeit bei vertikaler Ausrichtung oder Umkehr des Wärmestroms höher sein wird. In vorherigen Untersuchungen, siehe Abschlussbericht »Wärmedämmung mit Schaumglasschüttungen« (WäSch) [1], wurde bereits festgestellt, dass bei einer senkrechten Anordnung, als Wärmedämmung im Wandbereich, der Wärmestrom größer ist, da eine Luftdurchströmung (Turbulenzen im Luftraum) stattfindet. Bei den feuchten Proben wurde eine Messung mit horizontaler Anordnung und invertierter Wärmestromrichtung durchgeführt (siehe Kapitel 8.3.1) und festgestellt, dass die Wärmeleitfähigkeit dann höher ist.

Bisher wurden vom Labor 2 und Labor 1 jeweils folgende Prüfraumen verwendet:

Im Labor 2 wurden zwei verschiedene Prüfraumen aus Acrylglas für die Feuchtmessung und die Trockenmessung verwendet. Der Prüfraumen für die Feuchtmessung hat die Abmessungen 570 x 570 x 145 mm und wird auch für die Unterwasserlagerung verwendet. Der Prüfraumen für die Trockenmessungen hat die Maße 800 x 800 x 115 mm.

Die bisherigen Prüfraumen am Labor 1 haben die Abmessungen 550 x 550 x 100 mm. Die dort genutzte Wärmestrommessplatte hat mit 500 x 500 mm die identischen Abmessungen wie der Messbereich der Heizplatte am Labor 2.

Mit den bisherigen Prüfraumen und Verfahren ergaben sich beim Labor 2 und Labor 1 die in Tabelle 13 zusammengefassten Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 13: Wärmeleitfähigkeit, gemessen an trockenen Proben mit den bisherigen Prüfraumen.

| | Wärmeleitfähigkeit trocken und verwendete Einbaudichte | | | |
|------------|--|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| | Labor 1 | | Labor 2 | |
| Material A | 0,0796 W/(m·K) | 182,2 kg/m ³ | 0,0784 W/(m·K) | 174,2 kg/m ³ |
| Material B | 0,0822 W/(m·K) | 184,7 kg/m ³ | 0,0793 W/(m·K) | 188,0 kg/m ³ |

Die Details zu den Messungen sind in Tabelle 43 bis Tabelle 46 aufgeführt. Für Material A liegt die Differenz bei 1,5 %, bei Material B von 3,7 %. Diese Differenz liegt über der zu erwartenden Messabweichung, die beim Plattengerät üblicherweise 2 % beträgt [10]. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Einbaudichte und gemessener Wärmeleitfähigkeit ist nicht zu erkennen. Bei Material A war die Einbaudichte im Labor 2 niedriger, bei Material B höher als beim Labor 1. Trotzdem waren beide gemessenen Wärmeleitfähigkeiten niedriger. Da es sich bei den Messungen nicht um identische Proben, sondern um jeweils neu hergestellte Probekörper aus dem Schaumglasschotter handelt, kann die Differenz der Messergebnisse auch durch die Variabilität der Proben verursacht sein.

8.3 Änderungen am Prüfverfahren, neuer einheitlicher Prüfraumen

Da die Probenvorbereitung am Labor 1 und Labor 2 bereits auf die gleiche Weise durchgeführt wird, musste nur noch ein neuer, einheitlicher Prüfraumen definiert werden. Die Abmessungen wurden dabei so gewählt, dass die Proben sowohl für die Unterwasserlagerung als auch für die Messung der Wärmeleitfähigkeit geeignet sind. Die neuen Prüfraumen haben die Innenabmessungen 600 x 600 x 150 mm. Sie bestehen aus einem temperaturstabilen Material, damit eine Trocknung der Probe in dem Prüfraumen direkt möglich ist.



Bild 24: Neue Prüfraumen aus temperaturstabilem Material, Innenabmessungen: 600 x 600 x 150 mm.

Um die neuen Prüfkörper zu validieren, wurden Messungen der Wärmeleitfähigkeit an trockenen und feuchten Proben, sowie an einem Referenzmaterial (Blähglasschüttung) jeweils am Labor 1 und Labor 2 durchgeführt. Zunächst wurden die Messungen an dem trockenen Schaumglasschotter wie in Tabelle 13 wiederholt. Dabei wurde nicht das exakt gleiche Probenmaterial verwendet, sondern aus dem Vorrat eine neue Probe erstellt. Material, das bereits einmal eingebaut war, würde durch die Verdichtung so verändert, dass keine gleichen Werte mehr zu erwarten sind. In Tabelle 14 sind die Ergebnisse zusammengefasst und in Tabelle 47 bis Tabelle 50 sind die einzelnen Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 14: Wärmeleitfähigkeit, gemessen an trockenen Proben mit dem neuen einheitlichen Prüfraumen.

| | Wärmeleitfähigkeit trocken und verwendete Einbaudichte | | | |
|------------|--|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| | Labor 1 | | Labor 2 | |
| Material A | 0,0800 W/(m·K) | 182,4 kg/m ³ | 0,0780 W/(m·K) | 174,3 kg/m ³ |
| Material B | 0,0829 W/(m·K) | 184,7 kg/m ³ | 0,0823 W/(m·K) | 187,2 kg/m ³ |

Verglichen mit den alten Prüfraumen (Tabelle 13) werden wieder ähnliche Werte gemessen. Das Labor 1 misst, verglichen mit dem alten Prüfraumen, beide Male minimal höhere Werte. Beim Labor 2 ist auffällig, dass für Material B eine um 3,7 % höhere Wärmeleitfähigkeit mit dem neuen Prüfraumen gemessen wird. Dafür liegt der Wert bei Material A etwas niedriger. Stellt man alle vier Ergebnisse für Material B zusammen ($\lambda_{10} = 0,0822; 0,0793; 0,0829;$

0,0823 W/(m·K)) so scheint der erste Messwert beim Labor 2 ein Ausreißer zu sein. Dieser könnte durch die Streuung im Material verursacht worden sein. Bei Material A liegen die Messwerte im Bereich von $\pm 1,5\%$ um den gemeinsamen Mittelwert von 0,0790 W/(m·K).

Um unabhängig von der großen Inhomogenität des Schaumglasschotters die Messung zu überprüfen, wurde ein Referenzmaterial verwendet. Dieses sollte möglichst ähnliche wärmetechnische Eigenschaften wie Schaumglasschotter aufweisen. Das in Anhang 13.1 aufgeführte Blähglas wurde bereits im Labor 1 gemessen und als Referenz für Wärmeleitfähigkeitsmessungen in einem weiten Temperaturbereich verwendet. Dabei handelt es sich um ein feines Glasgranulat mit homogener Schüttung und einer Körnung von ca. 1 bis 2 mm. Die Wärmeleitfähigkeit und Schüttdichte liegen mit 0,067 W/(m·K) und 225 kg/m³ in der gleichen Größenordnung wie der geprüfte Schaumglasschotter.

Die neuen einheitlichen Prüfraumen wurden jeweils im Labor 1 sowie im Labor 2 mit der Blähglasschüttung überprüft. Dabei erfolgte der Einbau ohne Verdichtung der Schüttung, ansonsten aber analog zum Verfahren wie beim Schaumglasschotter.

Tabelle 15: Messung der Wärmeleitfähigkeit am Referenzmaterial aus Blähglas im neuen einheitlichen Prüfraumen mit 600 mm x 600 mm x 150 mm

| | Wärmeleitfähigkeit und Einbaudichte | | | |
|---------------|-------------------------------------|---------|--------------|-------------------|
| | Labor 1 | Labor 2 | Referenzwert | Einheit |
| Referenzprobe | 0,0671 | 0,0663 | 0,067 | W/(m·K) |
| | 231,1 | 227,5 | 225 | kg/m ³ |

Die Messungen am Referenzmaterial zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Referenzwert. Das Labor 1 ermittelte einen Wert der 0,1 % über, das Labor 2 einen Wert der 1,0 % unter dem Referenzwert für das Blähglas liegt. Die Messungen liegen also innerhalb der üblichen Messgenauigkeit des Plattenverfahrens.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Messungen der Labore 2 und 1 ist die Anwendung einer Ausgleichsmatte zwischen Probenoberfläche und Heizplatte bzw. Wärmestrommesser. Da die Heizplatte des GHP Gerätes starr ist, muss hier zwingend eine Ausgleichsschicht angewendet werden. Beim Wärmestrommesser, der eine flexible Oberfläche aufweist, ist eine Ausgleichsschicht nicht zwingend nötig. Vom Labor 1 wurden daher Vergleichsmessungen mit und ohne Ausgleichsschicht durchgeführt.

Tabelle 16: Messung mit und ohne Ausgleichsmatte zwischen Wärmestrommesser und Probenoberfläche, Labor 1.

| | Wärmeleitfähigkeit | | | |
|---------------|------------------------|-----------------------|--------------|---------|
| | Ohne Ausgleichsschicht | Mit Ausgleichsschicht | Referenzwert | Einheit |
| Referenzprobe | 0,0671 | 0,0672 | 0,067 | W/(m·K) |
| Material B | 0,0830 | 0,0829 | - | W/(m·K) |

Die Anwendung einer Ausgleichsschicht im HFM führt zu einer geringfügigen Änderung der gemessenen Wärmeleitfähigkeit von +/- 0,0001 W/(m·K) oder 0,1 %. Die Ausgleichsschicht kann also, je nach Gerät verwendet werden, ohne dass das Messergebnis signifikant beeinflusst wird.

8.3.1 Messung der Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand

An den Proben aus der Unterwasserlagerung (siehe Kapitel 9) wurde die Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand gemessen. Dazu wurden die Probekörper nach der Unterwasserlagerung direkt in den Plattenapparat eingebaut. Die Schüttung wurde nicht aus dem Prüfraumen entnommen.

Bei der Messung von feuchten Probekörpern tritt neben der Wärmeleitung noch ein Wärmeübertrag durch Massenumlagerung des Wassers bzw. Wasserdampfs auf. Nach DIN EN 12664 [9] muss daher der Wärmestrom über einen längeren Zeitraum als bei der Messung von trockenen Proben beobachtet werden. Durch die Umlagerung des Wassers wird die Probe auf der warmen Seite trockener, auf der Kaltseite sammelt sich mehr Feuchtigkeit an. Erst wenn sich der Wärmestrom nicht mehr ändert (weniger als 1 % innerhalb von 24 h), kann die Messung ausgewertet werden. Eine Möglichkeit die Änderung der Wärmeleitfähigkeit über den Messzeitraum zu begrenzen, ist die Probe so anzuordnen, dass die Kaltseite oben liegt. In diesem Fall kondensiert Wasser an der Kaltseite und läuft dann in der flüssigen Phase durch die Schwerkraft wieder zur Warmseite. Nach einer genügend langen Messzeit sollte sich so ein Gleichgewicht einstellen. Für Schaumglasschotter besteht aber die Einschränkung, dass wegen der ruhenden Luftschichten zwischen den einzelnen Körnern der Wärmestrom aufwärts grundsätzlich höher ist als abwärts. Um dieser Fragen auf den Grund zu gehen wurde im Wärmestrommessgerät des Labors 1 die Messung mit beiden Wärmestromrichtungen durchgeführt. Zunächst wurde für die erste Messung, die über einen Zeitraum von 6 Tage lief, die Probe in feuchtem Zustand mit dem Wärmestrom von unten (Warmseite) nach oben (Kaltseite) eingebaut. Dann wurde die Wärmestromrichtung umgedreht. Der Vorteil des HFM ist hier, dass die Probe nicht bewegt werden muss. Es muss nur die Temperatur des an den Heiz-/Kühlplatten angeschlossenen Cryostaten geändert werden. In diesem Zustand lief die Messung weitere 8 Tage. Beim Labor 2 wurde die Messung im Plattengerät durchgeführt und über 4 Tage beobachtet. Der Wärmestrom

wurde hier nicht invertiert, da im Plattengerät dazu die Probe umgebaut werden müsste. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Messungen an den feuchten Proben aufgeführt.

Tabelle 17: Wärmeleitfähigkeit, gemessen an feuchten Proben mit dem neuen einheitlichen Prüfraumen.

| | Wärmeleitfähigkeit feucht und Feuchtegehalt | | | |
|---------------------------------------|---|------------|---------------|------------|
| | Labor 1 | | Labor 2 | |
| Material A | - | | 0,119 W/(m·K) | 4,2 Vol. % |
| Material B, Wärmestrom abwärts | 0,122 W/(m·K) | 6,3 Vol. % | 0,122 W/(m·K) | 6,1 Vol. % |
| Material B, Wärmestrom aufwärts | 0,125 W/(m·K) | 6,3 Vol. % | - | - |

Der Vergleich von Messungen in Labor 2 und in Labor 1 zeigt, dass die gemessene Wärmeleitfähigkeit sehr gut übereinstimmt. Beide Labore messen eine Wärmeleitfähigkeit von 0,122 W/(m·K) bei Material B bei einem ähnlich hohen Feuchtegehalt von 6,3 Vol.-% und 6,1 Vol.-%. Bei der Messung mit umgedrehter Wärmestromrichtung, von unten nach oben, steigt der gemessene Wert leicht um 0,003 W/(m·K) an.

8.4 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Anhand der oben aufgeführten Daten kann gezeigt werden, dass bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Laboren erreicht wurde. Die Neudefinition der Prüfraumen und Abstimmung bei der Vorbehandlung verbessern die Übereinstimmung der Messergebnisse.

Allgemeine Empfehlungen für die Wärmeleitfähigkeitsmessung:

- Die Messung erfolgt nach DIN EN 12667 mit einem Wärmestrommesser oder einem Gerät mit geschützter Heizplatte.
- Der Prüfraumen hat die Abmessungen 600 mm x 600 mm x 150 mm für feuchte und trockene Messungen.
- Die Menge der verwendeten Schottermenge wird über die vorherbestimmte Schüttdichte berechnet. Die Verdichtung erfolgt auf 1,0:1,3.
- Der Einbau und das Verdichten des Schaumglasschotters in den Prüfraumen erfolgt per Hand mit schwerem Hammer und Holzplatte.

- Die Messung sollte mit einem Wärmestrom von oben nach unten durchgeführt werden.
- Thermoelemente für die Kaltseite werden auf dem Boden des Prüfrahmens angebracht.
- Thermoelemente für die Warmseite werden auf einzelnen Körnern der Schüttung positioniert. Die Thermoelemente können dabei auf einer Folie oder direkt auf den Glasschotter geklebt werden.
- Eine Ausgleichsmatte zwischen Schaumglasschotter und Heizplatte ist nur bei einem starren Wärmestrommesser oder bei einem Gerät mit geschützter Heizplatte notwendig.

Empfehlungen für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten Proben:

- Die Proben werden für die Messung der Wärmeleitfähigkeit im Prüfrahmen der Unterwasserlagerung belassen und nicht umgefüllt. Es wird jedoch der Deckel von der Probe entfernt.

9 Wasseraufnahme nach langzeitigem Eintauchen

9.1 Ausgangssituation und Literatur

Die Wasseraufnahme des Schaumglasschotters hat direkten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Daher ist in den nationalen Zulassungen [18] - [20] und in der EAD [24] vorgesehen, dass die Wasseraufnahme bei Lagerung nach 28 Tagen bestimmt wird. In den nationalen Zulassungen wird dazu genauer ausgeführt, dass die Proben im verdichteten Zustand gemessen werden müssen. Der Prüfrahm ist mit den Abmessungen 570 mm x 570 mm x 145 mm und die Eintauchtiefe auf 10 cm festgelegt. In der EAD wird dagegen auf die Prüfnorm EN 12087 (Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen) [7] verwiesen. Demnach soll das Verfahren 2A (vollständiges Untertauchen mit abschließenden Abtropfen) angewendet werden. Dabei werden die Proben nur 5 cm tief eingetaucht. In der EAD wird eine Mindestmenge von 10 l für eine Messung vorgesehen. Die Proben müssen dabei nur verdichtet eingebaut werden wenn es sich um eine lastabtragende Anwendung handelt.

Abweichend zu den Vorgaben der nationalen Zulassung soll nach der EN 12087 die Probe nach der Unterwasserlagerung nicht senkrecht, sondern in einem 45°-Winkel gelagert werden, damit das Oberflächenwasser vollständig abtropfen kann. Die zulässige Wassertemperatur wird mit $23\text{ °C} \pm 5\text{K}$ bestimmt.

Die EN 12087 [7] stammt aus dem Bereich Dämmstoffe. Daher ist das hier beschriebene Verfahren auch auf plattenförmige Dämmstoffe und nicht auf Gesteinsschüttungen ausgerichtet. Die alternative Prüfnorm DIN EN 1097-Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme [6] beschreibt ein Verfahren zur Wasseraufnahme an Gesteinskörnungen. Dabei wird die Probe für 24 h in einem Pyknometer gelagert. Das Oberflächenwasser wird dann mit Tüchern entfernt. Dieses Verfahren ist also nicht für die Bestimmung der Langzeitaufnahme geeignet. Die Erfahrung im Labor hat gezeigt, dass der Schaumglasschotter auch noch nach 14 Tagen weiteres Wasser aufnehmen kann. Zudem kann mit diesem Verfahren keine verdichtete Probe gemessen werden. Daher wurde dieses Verfahren nicht weiter untersucht, sondern die Prüfungen in Anlehnung an EN 12087, Verfahren 2A durchgeführt.

9.2 Vergleichsmessungen

An den beiden Materialien wurde im Labor 1 und Labor 2 die Feuchteaufnahme bestimmt. Dabei kam der neue Prüfrahm wie in Kapitel 8: Wärmeleitfähigkeit beschrieben, zum Einsatz (60 cm x 60 cm x 15 cm). Analog zur Messung der Wärmeleitfähigkeit wird der Prüfrahm mit der vorher anhand der Schüttdichte berechneten Menge Schaumglasschotter befüllt und dann per Hand mit Hilfe von schwerem Hammer und einer Holzplatte verdichtet. Der Probekörper wird dann mit einem Lochblech verschlossen. Die Unterwasserlagerung erfolgte bei $23\text{ °C} \pm 5\text{K}$ und mit einer Überdeckung von 10 cm. Nach

der Entnahme aus dem Wasserbecken werden die Prüfrahmen für 10 min senkrecht gestellt, um das freie Wasser ablaufen zu lassen. Diese Messung wurde in beiden Laboren durchgeführt. Vom Labor 2 wurde zusätzlich zur Messung im Prüfrahmen nach Zulassung (57 cm x 57 cm x 14,5 cm) noch eine Messung mit einem kleineren Prüfrahmen durchgeführt (55 cm x 55 cm x 11,5 cm).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 und im Detail im Anhang in Tabelle 56 bis Tabelle 59 aufgeführt. Die Wasseraufnahme lag bei Material A zwischen 5,0 und 7,8 Vol.-%, bei Material B zwischen 5,8 und 7,1 Vol.-%. In beiden Fällen wurde im Labor 2 im Mittel eine etwas geringere Wasseraufnahme festgestellt, wobei die Einbaudichte für Material A im Labor 1 deutlich höher, für Material B etwas niedriger war. Somit können die Differenzen auf das Material zurückgeführt werden. Bei der Messung mit den gleichen Probekörpern wurde im Labor 1 bei Material A nahezu die gleichen Werte gemessen, bei Material B variieren die Werte um ca. 1 Vol.-%. Bei dem Vergleich von verschiedenen großen Prüfrahmen beim Labor 2 sieht es so aus, dass die Feuchtegehalte mit zunehmender Probekörpergröße ansteigen. Daher sollte die bisher gewählte Probekörpergröße beibehalten und keine sehr viel kleineren Prüfrahmen verwendet werden.

Es zeigt sich in der Laborpraxis, dass wie in Kapitel 3.5 beschrieben, bei der Herstellung der Proben ein relevanter Anteil von Sand anfallen kann, der sich dann am Boden des Prüfrahmens sammelt. Außerdem bleibt bei der Entnahme aus dem Wasserbecken und anschließendem Senkrechtstellen der Proben immer ein Teil freies Wasser im Prüfrahmen, welches nicht ablaufen kann.

Es wird daher vorgeschlagen, die Proben beim Eintauchen einmal umzudrehen, damit der Sand aus der Probe gespült wird. Außerdem sollte, wie in EN 12087 beschrieben, die Probe zum Abtropfen 45° schräg gestellt werden. So ist sichergestellt, dass das Wasser vollständig aus dem Prüfrahmen ablaufen kann.

Tabelle 18: Wasseraufnahme nach 28 Tagen Unterwasserlagerung in verschiedenen Prüfrahmen.

| Material | Prüfrahmen L x B x H [cm] | Wasseraufnahme nach 28 Tagen Unterwasserlagerung und Einbaudichte | | | |
|------------|---------------------------------|--|-------------------|---------|-------------------|
| | | Labor 1 | | Labor 2 | |
| | | Vol.-% | kg/m ³ | Vol.-% | kg/m ³ |
| Material A | 60 x 60 x 15 | 7,62 | 185,0 | - | - |
| | | 7,75 | 185,9 | 5,31 | 174,2 |
| | 57 x 57 x 14,5 | - | - | 4,87 | 174,2 |
| | 55 x 55 x 11,5 | - | - | 4,98 | 174,2 |
| Material B | 60 x 60 x 15 | 6,05 | 181,9 | - | - |
| | | 6,07 | 181,0 | - | - |
| | | 7,06 | 182,5 | 6,77 | 187,2 |
| | 57 x 57 x 14,5 | - | - | 5,87 | 187,2 |
| | 55 x 55 x 11,5 | - | - | 5,82 | 187,2 |

9.3 Zusammenfassung und Vorschlag für eine Prüfanweisung

Empfehlungen für die Messung der Wasseraufnahme bei langfristiger Unterwasserlagerung:

- Messung in Anlehnung an EN 12087, Verfahren 2A.
- Eintauchtiefe 10 cm.
- Prüfrahmen mindestens 55 x 55 x 10 cm oder den gleichen Prüfrahmen, wie bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung (60 x 60 x 15 cm).
- Prüfung im verdichteten Zustand (1,0:1,3).
- Einbau und Verdichten des Schaumglasschotters in den Prüfrahmen per Hand mit schwerem Hammer und Holzplatte.
- Beim ersten Eintauchen den Sand aus der Probe ausspülen durch seitliches Kippen.
- Lagerung 28 Tage.
- Vor dem Wiegen 10 min Abtropfen, dabei Prüfrahmen in einem 45° Winkel über Kopf stellen.

10 Zusammenfassung

Anhand von Literaturrecherchen, Abstimmungen zwischen den Laboren und Vergleichsmessungen konnte für die Messung von Kennwerten an Schaumglasschotter Vorschläge für angepasste Prüfvorschriften und Verfahren entwickelt werden.

Folgende Punkte wurden im Rahmen dieses Projektes bearbeitet

I. Materialvorbehandlung

Für die Entnahme aus dem Liefergebinde, die Trocknung, Behandlung im Mischer und den Umgang mit den Sandanteilen wurden folgende Abläufe vorgeschlagen.

- Die Proben können direkt aus dem Liefergebinde im Labor gemessen werden, ohne dass eine Selektion aus dem Big Bag nötig ist, Sand der am Boden des Liefergebendes anfällt, sollte nicht verwendet werden.
- Die Vorbehandlung im Mischer sollte beibehalten werden.
- Trocknung nur an der Witterung ausgesetzten Proben notwendig, dann 7 Tage bei 50 °C.
- Sand, der bei der Vorbereitung anfällt, sollte abgetrennt werden.

II. Schüttdichtebestimmung

Für die Schüttdichtebestimmung wurde die Größe des Behälters und das Verfahren zum Einfüllen genauer definiert. Die Schüttdichte kann so genauer bestimmt werden. Im Einzelnen wurden folgende Vorschläge gemacht:

- Prüfung in Anlehnung an EN 1097-3.
- Prüfbehälter min. 40 l (300 mm Durchmesser, 600 mm Höhe).
- Kein Aufschlagen oder Rütteln beim Einfüllen.
- Einfüllen mit Schaufel auf Höhe des Behälterrand.
- Oberfläche wird per Hand abgeglichen, so dass möglichst einheitliche Ebene entsteht. Die Überstehende Körner sollten die „Lücken“ ausgleichen.
- Mindestens 3 Messungen für ein Ergebnis.

Da die Proben nicht mehr durch Rütteln oder Aufschlagen verdichtet werden, wird nach dem neuen Verfahren die Schüttdichte etwas niedriger ausfallen. Die im Ringversuch ermittelten Messergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung.

III. Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung wurde durchgeführt und Vorschläge für eine Verfahrensanweisungen erarbeitet.

- Prüfung in Anlehnung an EN 933-1.

- Trockensiebung.
- Siebung per Hand.
- Mindestmenge 40 l für eine Messung.
- Feinanteile bzw. Sand ($<1/10$ Kleinstkorn) sollten nicht berücksichtigt werden.

IV. Rohdichte

Für die Rohdichtebestimmung von Einzelkörnern wurde ein alternatives Verfahren mit Glaskugeln anstatt Wasser entwickelt. Dieses ist für eine einfache und schnelle Bestimmung geeignet. Es besteht aber eine Einschränkung hinsichtlich der Größe der messbaren Körner. Die im Ringversuch ermittelten Messergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung, vorausgesetzt die einzelnen Körner waren nicht zu klein. Für das alternative Sander-satzverfahren gilt:

- Prüfsand aus einheitlichen Glaskugeln mit ca. 1 mm Durchmesser verwenden.
- Prüfbehälter sollte maximal 15 x das Volumen der gemessenen Körner betragen, Mindestens 10 mm Abstand zwischen Korn und Behälterwandung.

V. Druckspannung

Für die Bestimmung der Druckspannung wurden Messungen in verschiedenen Prüfraumen durchgeführt. Es wurde ein neuer runder größerer Prüfraum getestet. Die im Ringversuch an grober Schaumglaskörnung ermittelten Messergebnisse zeigten so eine verbesserte Übereinstimmung zwischen den Laboren. Im Einzelnen wurden folgende Vorschläge erarbeitet

- Prüfung in Anlehnung an EN 826.
- Neuer Prüfraum (Rund \varnothing 250 mm, Höhe 230 mm).
- Füllmenge für die Prüfung wird vorher anhand der Schüttdichte bestimmt.
- Vorverdichtung der Proben im Verhältnis 1,0:1,3 auf 170 mm Probenhöhe.
- Prüfung mit 10 % Stauchung (17 mm Verdichtungsweg).

Es wird empfohlen den größeren Probekörper für die Druckspannungsmessung einzuführen. Es ist dabei damit zu rechnen, dass die damit gemessenen Druckspannungen eher niedriger liegen, als beim bisher verwendeten Prüfraum. Beim Vergleich von Messungen an einer feinkörnigen Schüttung konnte eine gute Wiederholbarkeit erzielt werden.

VI. Wärmeleitfähigkeit

Das Verfahren wurde genauer beschrieben und ein neuer einheitlicher Prüfraum erfolgreich getestet. Die im Ringversuch ermittelten Messergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung. Dies gilt sowohl für die Messungen im trocknen als auch im feuchten Zustand. Die Vorschläge im Einzelnen:

- Prüfung nach an EN 12667.

- Neuer Prüfraumen mit den Abmessungen L 600 mm x B 600 mm x H 150 mm.
- Material wird per Hand im Verhältnis 1,0:1,3 verdichtet im Prüfraumen eingebaut. Dabei erfolgt die Bestimmung der Einbaumasse über die vorher gemessene Schüttdichte.
- Wärmestrom von Oben nach Unten gerichtet.
- Thermoelemente direkt auf die Schüttung aufbringen.
- Ausgleichsmatten nur bei starren Wärmestrommesser oder Gerät mit geschützter Heizplatte notwendig.
- Für die Messung von feuchten Proben: Die Messung sollte direkt mit dem Prüfraumen aus der Unterwasserlagerung erfolgen. Die Proben nicht vor der Messung umfüllen.

VII. Wasseraufnahme bei langfristigem Eintauchen

Das Verfahren zur Messung der Wasseraufnahme wurde genauer beschrieben und Vorschläge für eine Anpassung erarbeitet. Die im Ringversuch ermittelten Messergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung. Die Vorschläge im Einzelnen:

- Prüfung in Anlehnung an EN 12087, Verfahren 2A.
- Eintauchtiefe 10 cm.
- Prüfraumen mindestens 55 x 55 x 10 cm oder den gleichen Prüfraumen, wie bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung (60 x 60 x 15 cm).
- Prüfung im verdichteten Zustand (1,0:1,3).
- Einbau und Verdichten des Schaumglasschotters in den Prüfraumen per Hand.
- Beim ersten Eintauchen den Sand aus der Probe ausspülen durch seitliches Kippen.
- Vor dem Wiegen 10 min Abtropfen, dabei Prüfraumen in einem 45° Winkel über Kopf stellen.

11 Literatur

- [1] Abschlussbericht Wärmedämmung mit Schaumglasschüttungen (WäSch) – HTB-035/2014
- [2] DIN EN 826: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 826:2013, Beuth-Verlag, Berlin.
- [3] DIN EN 932-1: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 1: Probennahmeverfahren, Deutsche Fassung EN 932-1:1996. November 1996 Beuth-Verlag, Berlin.
- [4] DIN EN 933-1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012, März 2012 Beuth-Verlag, Berlin
- [5] DIN EN 1097-3: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt; Deutsche Fassung EN 1097-3:1998, Juni 1998 Beuth-Verlag, Berlin.
- [6] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2013. Beuth-Verlag, Berlin.
- [7] DIN EN 12087: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen, Deutsche Fassung EN 12087:2013, Beuth-Verlag, Berlin.
- [8] DIN EN 12429: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Einstellen der Ausgleichsfeuchte bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen; Deutsche Fassung EN 12429:1998, Beuth-Verlag, Berlin.
- [9] DIN EN 12664: 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; Deutsche Fassung EN 12664:2001. Beuth-Verlag, Berlin.
- [10] DIN EN 12667: 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; Deutsche Fassung EN 12667:2001. Beuth-Verlag, Berlin.
- [11] DIN EN 13055: Leichte Gesteinskörnungen, Deutsche Fassung EN 13055:2016, Beuth-Verlag, Berlin.
- [12] DIN EN 13055-1 (zurückgezogen): Leichte Gesteinskörnungen Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Deutsche Fassung EN 13055-1:2002, Beuth-Verlag, Berlin
- [13] DIN EN 13167: Wärmedämmstoffe für Gebäude — Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) — Spezifikation, Deutsche Fassung EN 13167:2012+A1:2015. Beuth-Verlag, Berlin.
- [14] DIN EN 14315-2: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-

- Spritzschaum - Teil 2: Spezifikation für die eingebauten Produkte, Deutsche Fassung EN 14315-2:2013, Beuth-Verlag, Berlin
- [15] DIN 18125-2: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche, Deutsche Fassung DIN 18125-2:2011, Beuth-Verlag, Berlin.
- [16] DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch, Deutsche Fassung DIN 18127:2012, Beuth-Verlag, Berlin.
- [17] DIN EN ISO 6946 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren Deutsche Fassung EN ISO 6946:2018-03, Beuth-Verlag, Berlin.
- [18] DIBt, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-23-34-1390: Schüttungen aus Schaumglasschotter "Misapor 10/50" und "Misapor 10/75" für die Anwendung unter lastabtragenden Gründungsplatten, 19.08.2016
- [19] DIBt, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-23.34-1579: Schüttung aus Schaumglas-Schotter und –Splitt "GEOCELL" für die Anwendung unter lastabtragenden Gründungsplatten, 05.06.2015
- [20] DIBt, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-23.34-1847: Schüttung aus Schaumglas-Schotter "ecoglas" als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten, 22.05.2014
- [21] DIBt, Europäische Technische Zulassung ETA-13/0549: Misapor - werksmäßig hergestellte Schüttung aus Schaumglasschotter, 22.06.2013
- [22] DIBt, Europäische Technische Bewertung ETA-17/0914: versio – werksmäßig hergestellte Schüttung aus Schaumglasschotter, 04.12.2017
- [23] DIBt, Kontrollplan für ETA-17/0914: versio – werksmäßig hergestellte Schüttung aus Schaumglasschotter, 25.04.2018
- [24] EOTA, European Assessment Document EAD 040394-00-1201: Factory made cellular glass loose fill, Januar 2018

12 Anhang

12.1 Tabellen zu Kapitel 3: Materialvorbehandlung

Tabelle 19: Schüttdichte, Material A, obere Ebene aus dem Big Bag, ungemischt und gemischt, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Probe nicht gemischt Schüttdichte | Probe gemischt Schüttdichte |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 129,6 | 127,0 |
| 2 | 127,7 | 128,3 |
| 3 | 127,3 | 128,9 |
| 4 | 126,1 | 131,4 |
| Mittelwert | 127,7 | 128,9 |
| Differenz | 0,9 % | |

- Volumen Eimer: 42,3 Liter
- Vorbehandlung: keine (ungemischt)/ 2 min im Trommelmischer

Tabelle 20: Schüttdichte, Material A, mittlere Ebene aus dem Big Bag, ungemischt und gemischt, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Probe nicht gemischt Schüttdichte | Probe gemischt Schüttdichte |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 127,8 | 133,3 |
| 2 | 127,7 | 131,9 |
| 3 | 135,2 | 134,3 |
| 4 | 132,0 | 132,6 |
| 5 | 132,0 | 132,6 |
| Mittelwert | 131,0 | 132,9 |
| Differenz | 1,4 % | |

- Volumen Eimer: 42,3 Liter
- Vorbehandlung: keine (ungemischt)/ 2 min im Trommelmischer

Tabelle 21: Schüttdichte, Material A, untere Ebene aus dem Big Bag, gemischt, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Schüttdichte |
|-------------|-------------------|
| | kg/m ³ |
| 1 | 129,7 |
| 2 | 126,7 |
| 3 | 128,5 |
| 4 | 128,4 |
| Mittelwert | 128,3 |

- Volumen Eimer: 42,3 Liter
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer

12.2 Tabellen zu Kapitel 4: Schüttdichtebestimmung

Tabelle 22: Schüttdichte, Vergleich Art der Befüllung neues Verfahren, Material A, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Schüttdichte | | |
|-------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Überfüllt | Ausgeglichene Befüllung | Befüllung ohne Überstand |
| | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 128,5 | 127,0 | 125,1 |
| 2 | 129,5 | 128,3 | 126,7 |
| 3 | 130,1 | 128,9 | 127,8 |
| 4 | 132,7 | 131,4 | 129,7 |
| 5 | 133,3 | 132,2 | 130,4 |
| Mittelwert | 130,8 | 129,6 | 127,9 |
| Differenz | +0,9% | - | -1,3 % |

- Volumen Eimer: 42,31 Liter
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer gemischt

Tabelle 23: Schüttdichte neues Verfahren, Material A, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Schüttdichte | | |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung |
| | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 137,1 | 138,2 | 142,9 |
| 2 | 139,4 | 139,5 | 141,1 |
| 3 | 137,3 | 137,4 | 142,7 |
| Mittelwert | 137,9 | 138,4 | 142,2 |

- Volumen Eimer: 43 Liter
- Vorbehandlung: bei 80 °C getrocknet, 2 min im Trommelmischer gemischt

Tabelle 24: Schüttdichte neues Verfahren, Material B Messung Labor 1

| Messung Nr. | Schüttdichte | | |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung |
| | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 135,1 | 135,4 | 136,2 |
| 2 | 133,9 | 135,3 | 136,8 |
| 3 | 134,4 | 134,1 | 135,8 |
| Mittelwert | 134,5 | 134,9 | 136,3 |

- Volumen Eimer: 43 Liter
- Vorbehandlung: bei 80 °C getrocknet, 2 min im Trommelmischer gemischt

Tabelle 25: Schüttdichte neues Verfahren, Material B, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Schüttdichte | |
|----------------|-------------------|-------------------|
| | 1. Messung | 2. Messung |
| | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 149,2 | 134,1 |
| 2 | 144,5 | 132,1 |
| 3 | 140,8 | 132,2 |
| 4 | 143,1 | 134,4 |
| 5 | 143,1 | 133,0 |
| 6 | 146,7 | - |
| Mittelwert | 144,6 | 133,2 |

- Volumen Eimer: 42,3 Liter
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer gemischt

Tabelle 26: Schüttdichte neues Verfahren, Vergleich Bestimmung durch zwei Mitarbeiter an zwei Chargen, identischen Probe, Material A, Messung Labor 2

| | Messung Nr. | Mitarbeiter 1 | Mitarbeiter 2 |
|----------|-------------|-------------------|-------------------|
| | | kg/m ³ | kg/m ³ |
| Charge 1 | 1 | 131,1 | 127,0 |
| | 2 | 132,3 | 128,3 |
| | 3 | 130,3 | 128,9 |
| | 4 | 131,6 | 131,4 |
| | 5 | 131,0 | - |
| | Mittelwert | 131,2 | 128,9 |
| | Differenz | 1,8 % | |
| Charge 2 | 1 | 133,3 | 129,3 |
| | 2 | 131,9 | 134,7 |
| | 3 | 134,3 | 140,9 |
| | 4 | 132,6 | 133,9 |
| | 5 | 132,6 | 137,6 |
| | Mittelwert | 132,9 | 135,3 |
| | Differenz | 1,8 % | |

- Volumen Eimer: 42,3 Liter
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer gemischt

12.3 Tabellen zu Kapitel 5: Korngrößenverteilung

Tabelle 27: Korngrößenverteilung, Material B, Messung Labor 2

| | | | Charge 1 | | Charge 2 | | Charge 3 | |
|--------------------|------------------------|--------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| Masse der Probe kg | | | 5,386 | | 5,288 | | 6,611 | |
| Sieb Nr. | Siebtyp | Siebgröße mm | Anteil Rückstand | Summe der Durchgänge | Anteil Rückstand | Summe der Durchgänge | Anteil Rückstand | Summe der Durchgänge |
| | | | M.-% | M.-% | M.-% | M.-% | M.-% | M.-% |
| 1 | Qua- draht- loch | 90 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 |
| 2 | | 75 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 |
| 3 | | 63 | 1,7 | 98,3 | 1,5 | 98,5 | 0,0 | 100,0 |
| 4 | | 50 | 13,7 | 84,6 | 15,1 | 83,5 | 3,7 | 96,3 |
| 5 | | 45 | 14,9 | 69,7 | 10,1 | 73,3 | 6,3 | 90,1 |
| 6 | | 31,5 | 52,4 | 17,3 | 49,2 | 24,1 | 49,4 | 40,7 |
| 7 | | 22,4 | 12,8 | 4,5 | 15,5 | 8,6 | 27,8 | 12,9 |
| 8 | | 16 | 1,6 | 2,9 | 4,0 | 4,6 | 6,3 | 6,6 |
| 9 | | 10 | 0,1 | 2,7 | 0,4 | 4,2 | 3,1 | 3,5 |
| 10 | Draht- gitter | 5,6 | 0,0 | 2,7 | 0,0 | 4,2 | 0,8 | 2,7 |
| 11 | | 2 | 0,0 | 2,7 | 0,0 | 4,2 | 0,1 | 2,7 |
| Auffangschale | | | 2,9 | - | 4,2 | - | 2,7 | - |

- Prüfnorm: DIN EN 933-1:2012-03
- Verfahren: Trocken, per Hand
- Vorbehandlung: keine
- Geprüftes Volumen: ca. 40 l

12.4 Tabellen zu Kapitel 6 Rohdichte des gelieferten Vollmaterials

Tabelle 28: Rohdichteermittlung mit Sandersatzverfahren, Vergleich Ergebnisse Labor 2 und Labor 1 an den gleichen Körnern, Material A

| Probe | Mittlere Masse | Mittleres Volumen | Rohdichte Labor 2 | Rohdichte Labor 1 | Differenz |
|---------------------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | g | ml | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 23,63 | 0,092 | 256,3 | 259,9 | 3,6 |
| 2 | 19,89 | 0,080 | 249,9 | 247,4 | -2,5 |
| 3 | 27,88 | 0,127 | 219,9 | 221,6 | 1,7 |
| 4 | 20,28 | 0,075 | 268,5 | 279,3 | 10,8 |
| 5 | 8,29 | 0,033 | 266,0 | 235,9 | -30,1 |
| Mittelwerte | | | 252,1 | 248,82 | -3,28 |
| Differenz der Mittelwerte | | | 1 % | | |

Tabelle 29: Rohdichteermittlung mit Sandersatzverfahren, Vergleich Ergebnisse Labor 2 und Labor 1 an den gleichen Körnern, Material B

| Probe | Mittlere Masse | Mittleres Volumen | Rohdichte Labor 2 | Rohdichte Labor 1 | Differenz |
|---------------------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | g | ml | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 14,50 | 0,0520 | 284,6 | 271,1 | -13,5 |
| 2 | 17,40 | 0,0628 | 288,0 | 267,0 | -21,0 |
| 3 | 11,74 | 0,0430 | 287,3 | 262,0 | -25,3 |
| 4 | 6,46 | 0,0191 | 401,5 | 289,1 | -112,4 |
| 5 | 22,63 | 0,0847 | 268,4 | 265,5 | -2,9 |
| Mittelwerte | | | 306,0 | 270,9 | -35,0 |
| Differenz der Mittelwerte | | | 11 % | | |

Tabelle 30: Gemittelte Messergebnisse zur Bestimmung der Dichte mit dem Glaskugelverdrängungsverfahren und dem Pyknometer-Verfahren, Zugeschnittene Probekörper, Messung Labor 2

| | | Glaskugelverdrängung | | Wasserverdrängung | | Differenz |
|------------|-------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Probe | Masse | Volumen | Dichte | Volumen | Dichte | |
| | g | cm ³ | kg/m ³ | cm ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 | 12,41 | 43,09 | 282,73 | 45,32 | 273,90 | -8,83 |
| 2 | 11,10 | 34,15 | 325,20 | 34,98 | 317,89 | -7,31 |
| 3 | 10,56 | 39,71 | 266,24 | 41,90 | 252,91 | -13,33 |
| 4 | 10,08 | 34,76 | 290,19 | 35,08 | 287,45 | -2,74 |
| 5 | 12,75 | 43,23 | 294,69 | 45,71 | 278,94 | -15,75 |
| Mittelwert | | - | 291,81 | - | 282,2 | -9,59 |

12.5 Tabellen zu Kapitel 7: Druckspannung bei 10 % Stauchung

Tabelle 31: Druckspannung, Ausgangszustand, Material A, Messung Labor 1

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 449 | 495 | 462 | 459 | 503 | 474 | 23,8 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Elektromechanische Universalprüfmaschine
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 170 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 186,3 kg/m³

Tabelle 32: Druckspannung, Ausgangszustand, Material B, Messung Labor 1

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 524 | 522 | 432 | 488 | 492 | 492 | 37,2 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Elektromechanische Universalprüfmaschine
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 170 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 182,2 kg/m³

Tabelle 33: Druckspannung, Ausgangszustand, Material A, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 478 | 458 | 475 | 473 | 473 | 471 | 7,8 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 221 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 169,3 kg/m³

Tabelle 34: Druckspannung, Ausgangszustand, Material B, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 6 | Probe 7 | Mittel- wert | St.ab- wei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------|-------------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 658 | 650 | 665 | 573 | 560 | 539 | 512 | 594 | 62,7 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 221 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 188,0 kg/m³

Tabelle 35: Druckspannung, Prüfraumen Zylinderform, Material A, Messung Labor 1

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 560 | 517 | 536 | 475 | 582 | 534 | 41,1 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Elektromechanische Universalprüfmaschine
- Maße Prüfraumen: Ø 250 mm x 230 mm (D x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 185,8 kg/m³

Tabelle 36: Druckspannung, Prüfraumen Zylinderform, Material B, Messung Labor 1

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 511 | 522 | 563 | 498 | 529 | 525 | 24,5 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Elektromechanische Universalprüfmaschine
- Maße Prüfraumen: Ø 250 mm x 230 mm (D x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 182,3 kg/m³

Tabelle 37: Druckspannung, Prüfrahen Zylinderform, Material A, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 415 | 439 | 416 | 403 | 432 | 421 | 14,4 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfrahen: Ø 250 mm x 230 mm (D x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 172,1 kg/m³

Tabelle 38: Druckspannung, Prüfrahen Zylinderform, Material B, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 546 | 546 | 619 | 577 | 554 | 568 | 31,0 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfrahen: Ø 250 mm x 230 mm (D x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 188,0 kg/m³

Tabelle 39: Druckspannung, Prüfrahen Quaderform, Material A , Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 478 | 413 | 455 | 450 | 390 | 437 | 35,2 |
| 20 % | 660 | 600 | 658 | 635 | 580 | 627 | 35,5 |
| 25 % | 775 | 672 | 753 | 730 | 655 | 717 | 51,7 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfrahen: 200 mm x 200 mm x 221 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 166,8 kg/m³

Tabelle 40: Druckspannung, Prüfrahen Zylinderform, Material A, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 430 | 397 | 405 | 403 | 422 | 412 | 13,9 |
| 20 % | 619 | 560 | 583 | 611 | 599 | 594 | 23,5 |
| 25 % | 730 | 656 | 678 | 742 | 699 | 701 | 35,6 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfrahen: Ø 250 mm x 230 mm (D x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 166,8 kg/m³

Tabelle 41: Druckspannung, Prüfrahen Quaderform, Material B, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 493 | 498 | 475 | 499 | 480 | 489 | 10,9 |
| 20 % | 658 | 713 | 695 | 715 | 663 | 689 | 27,0 |
| 25 % | 760 | 825 | 793 | 823 | 748 | 790 | 35,3 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfrahen: 200 mm x 200 mm x 221 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 173,2 kg/m³

Tabelle 42: Druckspannung, Prüfrahen Zylinderform, Material B, Messung Labor 2

| Stau- chung | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 | Probe 4 | Probe 5 | Mittelwert | St.abwei- chung |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------------------|
| | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 10 % | 425 | 483 | 428 | 442 | 546 | 465 | 50,9 |
| 20 % | 607 | 701 | 634 | 699 | 707 | 670 | 45,9 |
| 25 % | 733 | 780 | 742 | 806 | 797 | 772 | 32,7 |

- Prüfnorm: DIN EN 826:2013-05
- Messgerät: Hydraulische Druckprüfmaschine
- Maße Prüfrahen: Ø 250 mm x 230 mm (D x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Vorverdichtung: 1,0:1,3
- Einbaudichte: 173,2 kg/m³

12.6 Tabellen zu Kapitel 8: Wärmeleitfähigkeit in trockenem und feuchtem Zustand

Tabelle 43: Wärmeleitfähigkeit trocken, Ausgangszustand, Material A, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | | | |
| 1 | 17,3 | 3,3 | 14,0 | 10,3 | 0,0796 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Wärmestrommessgerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 550 mm x 550 mm x 100 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 186,0 kg/m³ (trocken)

Tabelle 44: Wärmeleitfähigkeit trocken, Ausgangszustand, Material A, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | | | |
| 1 | 15,9 | 3,7 | 12,1 | 9,8 | 0,0784 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 800 mm x 800 mm x 115 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 174,2 kg/m³ (trocken)

Tabelle 45: Wärmeleitfähigkeit trocken, Ausgangszustand, Material B, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | | | |
| 1 | 17,2 | 3,3 | 13,9 | 10,2 | 0,0822 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Wärmestrommessgerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal,
Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 545 mm x 545 mm x 100 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 182,2 kg/m³ (trocken)

Tabelle 46: Wärmeleitfähigkeit trocken, Ausgangszustand, Material B, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | | | |
| 1 | 16,0 | 4,1 | 11,9 | 10,1 | 0,0793 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 800 mm x 800 mm x 115 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 188,0 kg/m³ (trocken)

Tabelle 47: Wärmeleitfähigkeit trocken, neuer Prüfraumen, Material A, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | | | |
| 1 | 17,5 | 2,9 | 14,6 | 10,2 | 0,0800 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Wärmestrommessgerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 184,7 kg/m³ (trocken)

Tabelle 48: Wärmeleitfähigkeit trocken, neuer Prüfraumen, Material A, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | | | |
| 1 | 13,8 | 6,3 | 7,5 | 10,0 | 0,0780 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 174,3 kg/m³ (trocken)

Tabelle 49: Wärmeleitfähigkeit trocken, neuer Prüfraumen, Material B, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|-----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1* ¹ | 17,5 | 3,0 | 14,5 | 10,2 | 0,0829 |
| 2* ² | 17,5 | 3,0 | 14,5 | 10,2 | 0,0830 |

*¹ Standard (keine Ausgleichsschicht)

*² zusätzliche Ausgleichsschicht zwischen Wärmestrommesser und Probe

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Wärmestrommessgerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 182,4 kg/m³ (trocken)

Tabelle 50: Wärmeleitfähigkeit trocken, neuer Prüfraumen, Material B, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1 | 15,9 | 4,1 | 11,8 | 10,0 | 0,0823 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 187,2 kg/m³ (trocken)

Tabelle 51: Wärmeleitfähigkeit feucht, Material B , Messung Labor 1

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|-----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1 ^{*1} | 15,5 | 4,1 | 11,3 | 9,8 | 0,125 |
| 2 ^{*2} | 15,6 | 4,5 | 11,1 | 10,0 | 0,122 |

*1 Wärmestromrichtung Standard von Oben nach Unten

*2 Wärmestromrichtung invertiert von Unten nach Oben

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Wärmestrommessgerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal,
- Wärmestrom: von Oben nach Unten/ von Unten nach Oben
- Maße Prüfrahmen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer, 28 Tage Unterwasserlagerung
- Einbaudichte: 245,5 kg/m³ (feucht)

Tabelle 52: Wärmeleitfähigkeit feucht, Material A, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1 | 14,1 | 5,4 | 8,7 | 9,8 | 0,119 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfrahmen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer, 28 Tage Unterwasserlagerung
- Einbaudichte: 231,3 kg/m³ (feucht)

Tabelle 53: Wärmeleitfähigkeit feucht, Material B, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1 | 12,8 | 7,2 | 5,5 | 10,0 | 0,122 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfrahmen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer, 28 Tage Unterwasserlagerung
- Einbaudichte: 254,6 kg/m³ (feucht)

Tabelle 54: Wärmeleitfähigkeit, Referenzmaterial, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1 | 18,2 | 1,9 | 16,4 | 10,0 | 0,0664 |

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Gerät mit geschützter Heizplatte, 500 mm x 500 mm
Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: keine
- Einbaudichte: 227,5 kg/m³ (feucht)

Tabelle 55: Wärmeleitfähigkeit, Referenzmaterial, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Mitteltemperatur der Probenoberfläche | | Mittlere Temperaturdif- ferenz | Mitteltempera- tur der Proben | Wärmeleit- fähigkeit |
|-----------------|--|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Heizplattenseite | Kühlplattenseite | | | |
| | °C | °C | K | °C | W/(m·K) |
| 1 ^{*1} | 17,6 | 2,0 | 15,5 | 9,8 | 0,0671 |
| 2 ^{*2} | 17,6 | 2,0 | 15,5 | 9,8 | 0,0672 |

^{*1} Standard (keine Ausgleichsschicht)

^{*2} zusätzliche Ausgleichsschicht zwischen Wärmestrommesser und Probe

- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05
- Messgerät: Wärmestrommessgerät mit 500 mm x 500 mm
Messfläche, horizontal, Wärmestrom von Oben nach Unten
- Maße Prüfraumen: 600 mm x 600 mm x 150 mm (L x B x H)
- Vorbehandlung: keine
- Einbaudichte: 231,1 kg/m³ (trocken)

12.7 Tabellen zu Kapitel 9: Wasseraufnahme nach langfristigem Eintauchen

Tabelle 56: Unterwasserlagerung, Material A , Messung Labor 1

| Messung Nr. | Einbaudichte (trocken) | Abmessungen Prüfrahmen L x B x H | | | Feuchtegehalt nach 28 Tagen |
|-------------|------------------------|----------------------------------|--------|------|-----------------------------|
| | | Länge | Breite | Höhe | |
| | kg/m ³ | mm | mm | mm | Vol.-% |
| 1 | 185,0 | 600 | 600 | 150 | 7,62 |
| 2 | 185,9 | 600 | 600 | 150 | 7,75 |

- Prüfnorm: Lagerung für 28 Tage unter Wasser
- Verfahren: 10 min Abtropfen in senkrechten Prüfrahmen
- Überdeckung: 10 cm Wasser
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 185 kg/m³ (trocken)

Tabelle 57: Unterwasserlagerung, Material B, Messung Labor 1

| Messung Nr. | Einbaudichte (trocken) | Abmessungen Prüfrahmen L x B x H | | | Feuchtegehalt nach 28 Tagen |
|-------------|------------------------|----------------------------------|--------|------|-----------------------------|
| | | Länge | Breite | Höhe | |
| | kg/m ³ | mm | Mm | mm | Vol.-% |
| 1 | 181,9 | 600 | 600 | 150 | 6,05 |
| 2 | 181,0 | 600 | 600 | 150 | 6,07 |
| 3 | 182,5 | 600 | 600 | 150 | 7,06 |

- Prüfnorm: Lagerung für 28 Tage unter Wasser
- Verfahren: 10 min Abtropfen in senkrechten Prüfrahmen
- Überdeckung: 10 cm Wasser
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 182 kg/m³ (trocken)

Tabelle 58: Unterwasserlagerung, Material A, Messung Labor 2

| Messung Nr. | Einbaudichte (trocken) | Abmessungen Prüfraumen L x B x H | | | Feuchtegehalt nach 28 Tagen |
|-------------|------------------------|----------------------------------|--------|------|-----------------------------|
| | | Länge | Breite | Höhe | |
| | kg/m ³ | mm | mm | mm | Vol.-% |
| 1 | 174,3 | 600 | 600 | 150 | 5,31 |
| 2 | 177,1 | 570 | 570 | 145 | 4,87 |
| 3 | 177,5 | 550 | 550 | 115 | 4,98 |

- Prüfnorm: Lagerung für 28 Tage unter Wasser
- Verfahren: 10 min Abtropfen in senkrechten Prüfraumen
- Überdeckung: 10 cm Wasser
- Vorbehandlung: 2 min im Trommelmischer
- Einbaudichte: 174 kg/m³

Tabelle 59: Unterwasserlagerung, Material B , Labor 2

| Messung Nr. | Einbaudichte (trocken) | Abmessungen Prüfraumen L x B x H | | | Feuchtegehalt nach 28 Tagen |
|-------------|------------------------|----------------------------------|--------|------|-----------------------------|
| | | Länge | Breite | Höhe | |
| | kg/m ³ | mm | mm | mm | Vol.-% |
| 1 | 187,0 | 600 | 600 | 150 | 6,77 |
| 2 | 187,8 | 570 | 570 | 145 | 5,87 |
| 3 | 187,6 | 550 | 550 | 115 | 5,82 |

- Prüfnorm: Lagerung für 28 Tage unter Wasser
- Verfahren: 10 min Abtropfen in senkrechten Prüfraumen
- Überdeckung: 10 cm Wasser
- Einbaudichte: 187 kg/m³

13 Anlage

13.1 Messkurve für Referenz Blähglas

KAL 107



Zertifikat über die Eigenschaften von Blähglas als Vergleichsmaterial für die Messung der Wärmeleitfähigkeit zu hohen Temperaturen Blähglas-Schüttung Los Nr. 03(2005/2008)

Eigenschaften der Charge

| | |
|--|---------|
| Charge mischverhältnis: | 1:1 |
| Chargengröße in l: | 150 |
| Schüttrohdichte (Mittelwert der Charge) in kg/m ³ : | 225 |
| Standardabweichung in kg/m ³ : | 1,43 |
| Anwendungsgrenztemperatur in °C: | 550 |
| Korngrößen in mm: | 1 bis 2 |

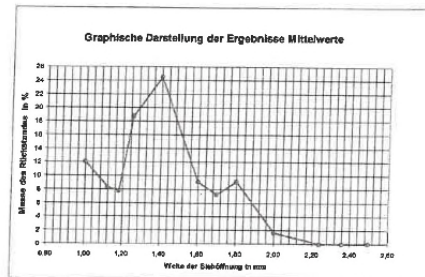


Bild 1: Mittlere Korngrößenverteilung der Charge

Spektrale Eigenschaften des gemörserten Glases:

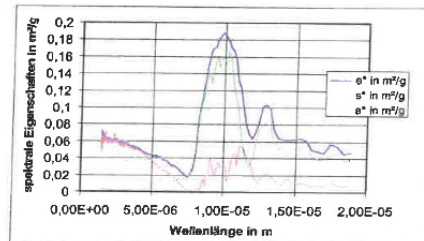


Bild 2: Spektrale Extinktion, Streuung und Absorption

Gräfelfing, den 25 November, 2016
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
Lochhamer Schlag 4 · 82166 Gräfelfing

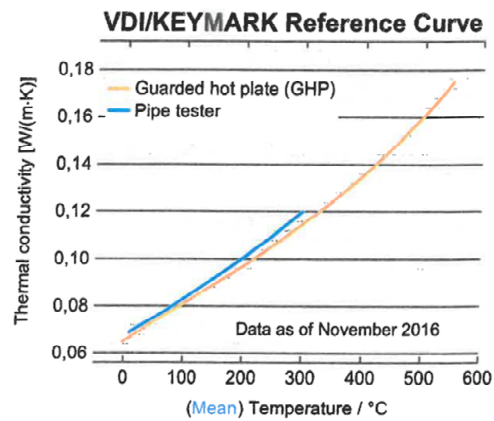
Telefon +49 (0)89 8 58 00 -0 · Telefax +49 (0)89 8 58 00 - 40
info@fiw-muenchen.de · www.fiw-muenchen.de

VDI/KEYMARK Reference Curve

Thermal Conductivity (Internal use only)

Material:

- Expanded glass granulate
- Particle size: 1-2 mm
- Loose bulk density: 225 kg/m³ (±10 %)



Guarded hot plate (GHP):

| | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperature in °C | 0 | 10 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 550 |
| Thermal conductivity in W/(m·K) | 0,065 | 0,067 | 0,073 | 0,081 | 0,097 | 0,115 | 0,135 | 0,160 | 0,175 |

Pipe tester:

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mean temperature in °C | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Thermal conductivity in W/(m·K) | 0,069 | 0,071 | 0,072 | 0,074 | 0,075 | 0,083 | 0,091 | 0,100 | 0,110 | 0,120 |



QAC, Lab-Group

November 2016