

## Charakterisierung von mineralisch gebundenen Kompositen zur Impaktdämpfung

Dipl.-Ing. Lena Leicht

Institut für Massivbau der TU Dresden, 01062 Dresden

E-Mail: lena.leicht@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 33311

### Zusammenfassung

Um Lebewesen oder Bauwerke vor Impakteinwirkungen zu schützen, können die unterschiedlichsten Herangehensweisen angewandt werden. Es kann beispielsweise Energie durch innere Reibung, plastische Verformung oder Abfederung absorbiert oder umgelenkt werden. Möglichkeiten der Umsetzung sind lose Schüttungen, die beispielsweise im Fall von Steinschlagschutzgalerien eingesetzt werden [1], oder geschichtete Aufbauten, wie sie zum Beispiel für Personenrüstungen zum Einsatz kommen [2]. Letztere sind sowohl in der Natur als auch in der Technik oft zu finden [2]–[6] und dienen als Grundlage für die nachfolgend entworfenen Schutzkonstruktionen, die sich aus mineralisch gebundenen Kompositen zusammensetzen. Sie sollen in der Lage sein, Stahlbetonkonstruktionen vor Impakteinwirkungen zu schützen. Zunächst wurden die Eigenschaften der verwendeten Materialien unter statischen und dynamischen Lasten untersucht. Anschließend wurden mehrlagige Dämpfungsschichtaufbauten auf Stahlbetonbauteile aufgebracht, um das Dämpfungsverhalten in größerem Maßstab in Fallturmversuchen zu charakterisieren.

### 1 Materialauswahl und -charakterisierung

Grundsätzlich besteht das Ziel des Forschungsprojektes darin, einen mehrschichtigen Aufbau zu finden, der aus mineralisch gebundenen Materialien besteht und Stahlbetonbauwerke vor Impakteinwirkungen schützt. Die Deckschicht soll das Eindringen des Impaktors verhindern und die Last des Aufpralls verteilen. Aus diesem Grund sollten die gewählten Materialien eine möglichst hohe Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Die darunterliegende Dämpfungsschicht hat die Aufgabe, die Impaktenergie, die in das zu schützende Bauteil übertragen werden könnte, zu reduzieren. Die für die jeweiligen Schichten verwendeten Materialien sind in Bild 1 dargestellt.



Bild 1 Übersicht über die verwendeten Materialien. Abbildung: Lena Leicht

Bevor eine Kombination unterschiedlicher Materialien auf ein Bauteil aufgebracht werden kann, müssen die Materialeigenschaften untersucht werden. Die Materialien wurden hinsichtlich ihres statischen und dynamischen Verhaltens charakterisiert. Letzteres wird aus dynamischen Druck- und Zugversuchen im Split-Hopkinson-Bar (SHB) ermittelt.

#### 1.1 Statische Materialeigenschaften der Deckschicht

Für die direkt von der Impaktbeanspruchung getroffene Deckschicht wurden zwei Materialien untersucht. Zum einen ein Textilbeton, bestehend aus einer Matrix aus dem Feinbeton Pagel TF10 [7], welche zweilagig mit einem Carbontextil des Typs SITgrid040KI [8] bewehrt ist. Das zweite Material ist ein vom Institut für Baustoffe der TU Dresden entwickelter Kurzfaserbeton mit einer Feinbetonmatrix mit Zementersatzstoffen und PE-Fasern [9]. Tabelle 1 enthält die Materialeigenschaften.

Tabelle 1 Eigenschaften der Deckschichtmaterialien

Material	Druckfestigkeit [MPa]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Pagel TF10	85	33.100	2,9	2.150
SHLC <sup>3</sup>	65,7	22.550	2,8	1.930
SITgrid040KI	-	195.000	2.200 (Garn)	-

## 1.2 Statische Materialeigenschaften der Dämpfungsschicht

Für die Dämpfungsschicht wurden Leichtbetone unterschiedlicher Dichten und Festigkeiten (ALWAC, PLC, ILC) und ein Beton mit Altgummizuschlägen (WTRC) untersucht. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 2 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass bei den Leichtbetonen mit der Trockenrohddichte auch die Festigkeit sinkt. Die Zusammensetzungen wurden der Literatur entnommen [10]–[12] und teilweise für die eigenen etwas Untersuchungen angepasst.

Tabelle 2 Materialeigenschaften der Dämpfungsschichtmaterialien

Material	Druckfestigkeit [MPa]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
ALWAC_L	37,1	14.363	1,7	1714
ALWAC_U	42,4	15.808	2,7	1719
PLC	2,1	1.867	0,2	934
ILC	12,7	6.282	0,3	1141
WTRC	19,1	17.160	2,4	2048

## 1.3 Dynamische Werkstoffuntersuchungen

Im Split-Hopkinson-Bar (SHB) werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Länge von 80 mm zwischen einem Ein- und einem Ausgangsstab eingebaut. Durch den Eingangsstab wird eine mechanische Welle in den Probekörper eingeleitet, im Fall des Druck-SHB eine Druckwelle und im Falle des Zug-SHB eine Zugwelle. Die eingeleiteten Wellen können zur Bestimmung der dynamischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, der Kraftübertragung und der Energieübertragung herangezogen werden. Die Energieabsorption bezogen auf die in den Eingangsstab eingeleitete Energie ist fast gleich für alle Materialien und blieb auch mit steigender Belastungsrate des Eingangsimpulses im untersuchten Bereich nahezu konstant (siehe Bild 2). Nur bei dem porösen Leichtbeton (PLC) und dem Infraleichtbeton (ILC) scheint das Energieabsorptionsvermögen mit steigender Belastungsrate leicht zu sinken. Das bedeutet, dass die Energieabsorption nicht als alleiniger Vergleich zwischen den Materialien dienen kann. Weitere Charakteristika sind die übertragene Kraft und die Schnelligkeit des Kraftanstiegs im Ausgangsstab, nachdem die Belastungswelle den Probekörper passiert hat. Aufgrund seiner geringen Impedanz, welche sich durch die Dichte und den E-Modul bestimmt, scheint der Infraleichtbeton eine starke Reduktion der Maximalkraft und des Kraftanstiegs zu gewährleisten.

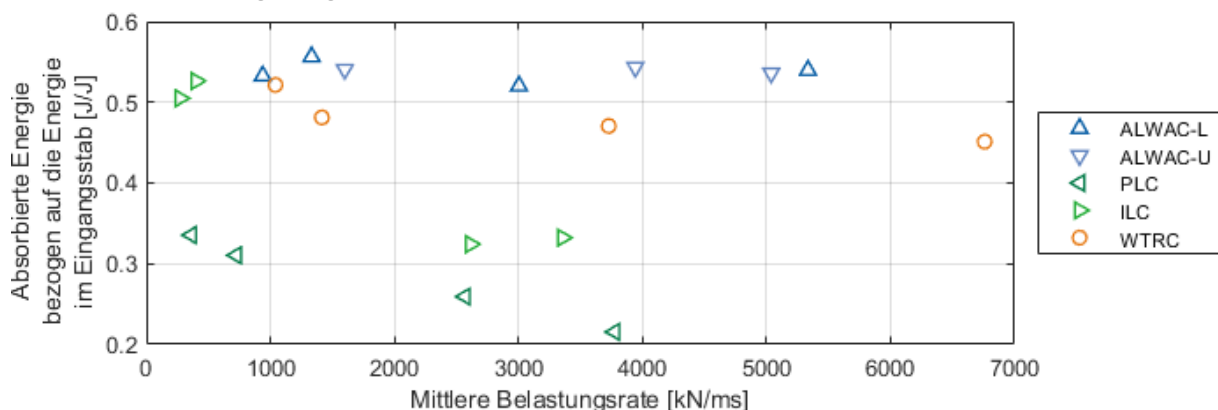
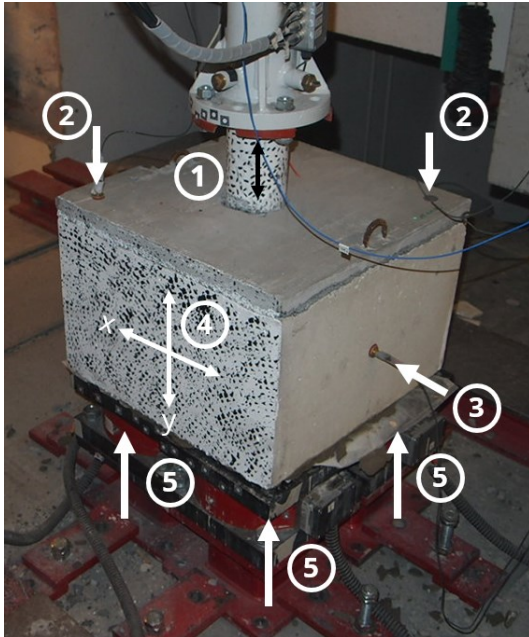


Bild 2 Absorbierte Energie bezogen auf die Eingangsenergie im Vergleich zur Belastungsrate. Grafik: Lena Leicht

## 2 Kombination von Dämpfungsmaterialien

### 2.1 Methodik der Quaderversuche

Die einzelnen Materialkombinationen werden zur weiteren Untersuchung auf Betonquader mit Außenabmessungen von  $l \times b \times h = 490 \times 490 \times 300 \text{ mm}^3$  aus einem C35/45 aufgebracht, um die Dämpfungseigenschaften unter Impaktbelastung in einem größeren Maßstab zu testen. Zu diesem Zweck wird eine beschleunigte Fallanlage verwendet [13], [14]. In dieser wird ein 380 mm langer Impaktor mit einer Masse von 21,66 kg mithilfe von Druckluft auf Geschwindigkeiten zwischen 25 und 55 m/s beschleunigt und trifft anschließend auf den Probekörper. Bild 3 zeigt einen Betonquader mit Dämpfungsschicht nach einem Impaktversuch.



- 1 Highspeedkamera → Impaktorgeschwindigkeit und -bremsung und daraus abgeleitet die Impaktorkraft
- 2 Vibrometer, Beschleunigungssensor (Oberseite), Highspeedkamera → Quaderverformung, -rückprallgeschwindigkeit und -beschleunigung
- 3 drei Beschleunigungssensoren → Querbeschleunigung
- 4 Highspeedkamera → Elongation des Quaders in Längs- und Querrichtung
- 5 Kraftmessdosen → Verlauf, Impuls und Ableitung der Auflagerkräfte

Bild 3 Eingebauter Probekörper mit eingezeichneten Messstellen. Abbildung: Lena Leicht

Nach dem Versuch kann die Schädigung der Betonquader aus Ultraschallmessungen und durch mechanische Anregung abgeleitet werden. Dies bietet einen weiteren Anhaltspunkt für die Schädigungsbewertung der Betonstruktur. Später sollen die Proben auch noch aufgesägt werden, um eine visuelle Betrachtung des Probeninneren zu ermöglichen.

### 2.2 Variation der Dämpfungsschicht

In Kombination mit einer Deckschicht aus Pagel mit zwei Lagen Carbontextil wurden zunächst die unterschiedlichen Dämpfungsschichtmaterialien (Tabelle 2) untersucht. Bei einem Vergleich der in Bild 3 dargestellten Messwerte wurde ermittelt, dass besonders Kombinationen mit Infraleichtbeton, wahrscheinlich aufgrund der geringen Impedanz des Materials, einen guten Schutz bieten. Das zeigt sich dadurch, dass die Schädigung des Betonquaders sehr gering ausfällt.

### 2.3 Variation der Deckschicht

Im nächsten Schritt wird die Variation der Deckschicht erfolgen. In diesem Zuge wird die Dicke des SHCL<sup>3</sup> variiert und auch der Einfluss eines dreidimensionalen Stahltextils untersucht. Außerdem wird ein dreilagiger Schichtaufbau bestehend aus Deckschichtmaterial, Dämpfungsschichtmaterial und darunter einer weiteren Lage des Deckschichtmaterials geprüft, um eine Umschnürungswirkung für die darunterliegende Stahlbetonstruktur zu erzeugen. Als Dämpfungsschicht wird in allen Versuchen eine 40 mm dicke Infraleichtbetonschicht verwendet.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl aus den Split-Hopkinson-Bar-Versuchen als auch den Quaderversuchen mit variierender Dämpfungsschicht lässt sich resümieren, dass der Infraleichtbeton als Dämpfungsmaterial sehr gut geeignet ist. Seine geringe Dichte und die daraus resultierende geringe mechanische Impedanz gewährleisten, dass die Kraftübertragung sehr gering ist und der Wellenanstieg der transmittierten Welle im Vergleich zur Eingangswelle reduziert wird. Letzteres führt dazu, dass die Kraft, die über die Infraleichtbetonschicht in die darunterliegende Betonstruktur übertragen wird, zeitlich gesehen langsamer ansteigt.

Nach den Versuchen mit der Variation der Deckschicht sollen mit der besten Materialkombination aus Deckschicht und Dämpfungsschicht noch weitere Impaktversuche, auch an großformatigen Platten unter Impaktbeanspruchung, durchgeführt werden.

### Danksagung

Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des GRK 2250 „*Mineral-bonded composites for enhanced structural impact safety*“ (Projektnummer 287321140) gefördert.

### Literatur

- [1] Wyrsh, R.; Roduner, A. (2013) *Neues Dämpfungssystem für Steinschlagschutzgalerien*. 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, S. 139–144. München.
- [2] Raabe, D.; Sachs, C.; Romano, P. (2005) *The crustacean exoskeleton as an example of a structurally and mechanically graded biological nanocomposite material*. *Acta Materialia* 53, S. 4281–4292. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.05.027>
- [3] Corni, I.; Critchley, R.; Stokes, K.; Walsh, F. C.; Wharton, J. A.; Wood, R. J. K. (2014) *High strain materials for body armour inspired from nature*. Online verfügbar: <https://www.researchgate.net/publication/267261907> (aufgerufen am 07.07.2022)
- [4] Krishnan, K.; Sockalingam, S.; Bansal, S.; Rajan, S. D. (2010) *Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact*. *Composites: Part B* 41, S. 583–593. <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.10.001>
- [5] Yin, H.; Wen, G.; Liu, Z.; Qing, Q. (2014) *Crashworthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures*. *Thin-Walled Structures* 75, S. 8–17. <http://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.022>
- [6] Svenson, H. (2009) *Protection of bridge piers against ship collision*. *Steel Construction* 2, S. 21–32. <http://doi.org/10.1002/stco.200910004>
- [7] PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG (2022) *TF10 CARBOrefit® Textilfeinbeton* [online, Produktdatenblatt]. Essen: PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG. <https://www.pagel.com/de/produkte/betoninstandsetzung/tf10-carborefit-textilfeinbeton/> (Zugriff am 15.07.2022)
- [8] WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH (2022) *Verstärkung und Instandsetzung* [online]. Hof: WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH. <https://solutions-in-textile.com/produkte/verstaerkung-und-instandsetzung> (Zugriff am 15.07.2022)
- [9] Beigh, M. A. B.; Nerella, V. N.; Schröfl, C.; Mechtcherine, V. (2020) *Studying the Rheological Behavior of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Mixtures in the Context of Extrusion-Based 3D-Printing*. *RILEM Book-series* 25, S. 229–236. [http://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4\\_26](http://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_26)
- [10] Quast, M.; Hummeltenberg, A.; Curbach, M. (2012) *Hochleistungsleichtbeton unter Impakt*. *Beton- und Stahlbetonbau* 107, S. 15–22. <http://doi.org/10.1002/best.201100076>
- [11] Lösch, C.; Hückler, A.; Schlaich, M. (2019) *Infraleichtbeton: Grundlagen, bauphysikalische Eigenschaften und Referenzbauwerke*. *Bauphysik* 41, S. 1–6. <http://doi.org/10.1002/bapi.201800029>
- [12] Najim, K. B.; Hall, M. R. (2012) *Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete*. *Construction and Building Materials* 27, S. 521–530. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.013>
- [13] Just, M.; Curbach, M.; Kühn, T.; Hering, M. (2015) *Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Behälter (Flugzeugtanks) – Phase 1A* [Schlussbericht]. 2015.
- [14] Hering, M.; Kühn, T.; Curbach, M. (2017) *Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Behälter (Flugzeugtanks) – Phase 1B* [Schlussbericht]. 2017.