

Ostheeren, K.; Ludwig, H.-M.

Kornformeinflüsse des Mehlkorns auf die rheologischen Eigenschaften selbstverdichtender Mörtel

Einleitung

Die Sensibilisierung der Bauindustrie für eine möglichst ökonomische und ökologische Verwendung bestehender Umweltressourcen ermöglicht die hochwertige Verwendung bisher ungenutzter Baumaterialien. Bei der Herstellung von Schotter und Splitt entstehen durch einfache Zerkleinerungsverfahren bis zu 20 M.-% Brechsand. Dieses „Nebenprodukt“ enthält einen Mehlkornanteil von 15 – 20 M.-% und wird derzeit je nach regional bedingtem Förderangebot entweder für untergeordnete Bodenverfüllungen wie Kabelsande oder Frostschutzschicht verwendet oder auf Halden deponiert. Eine qualitativ hochwertige Nutzung des gesamten Abbruchmaterials wäre einerseits nur unter kostenintensiver Optimierung des Zerkleinerungs- und Verarbeitungsprozesses möglich. Andererseits können bestehende Brechsandressourcen durch den zunehmenden Einsatz und die Weiterentwicklung von Selbstverdichtenden Betonen (SVB) einen neuen Anwendungsbereich finden. Die spezifischen Eigenschaften des SVBs, wie hohe Fließfähigkeit und selbstständiges Entlüften, werden u.a. durch einen hohen Anteil an Füllerkomponenten mit einer Korngröße $< 125\mu\text{m}$ und dem Einsatz von Fließmitteln realisiert. Derzeit werden als Füller und feine Gesteinskörnung vorrangig Materialien mit einer möglichst runden Kornform, wie Flugasche, Silikastaub und Natursande, eingesetzt. Mit der Entwicklung neuer Messtechniken zur Bestimmung der Kornform und Korngröße im Feinbereich kann der Einfluss der Kornform des Mehlkorns/Füllers quantitativ erfasst und das Verständnis zum Wirken der Gesteinskörnungen im Beton präzisiert werden. In diesem Beitrag wird aufbauend auf die Veröffentlichung [1] der betrachtete Kornformbereich hinsichtlich des Feinbereiches erweitert. Die sich für den gesamten Korngrößenbereich bis $1\mu\text{m}$ ergebenden Zusammenhänge der Granulometrie mit den rheologischen Eigenschaften werden diskutiert.

Messmethoden

Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten [1,2] konnten die Untersuchungen zur Kornform von feinen Gesteinskörnungen, wie Natur- und Brechsanden sowie Modellmischungen, auf den Korngrößenbereich $\leq 400\mu\text{m}$ erweitert werden. Die Auswertung der Korngrößenverteilung und der Kornform wurde durch die Kopplung unterschiedlicher Messverfahren realisiert.

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung erfolgte im Feinbereich $< 100\mu\text{m}$ mittels Laserbeugung mit dem Gerät COULTER LS 230 der Firma Beckman-Coulter und im Grobbereich $> 100\mu\text{m}$ mittels fotooptischer Analyse mit dem Gerät HAVER CPA 4-2 real time (CPA). Nach dem Prinzip der dynamischen

Bildanalyse erfasst das CPA mit einer Zeilenkamera die Partikel, die im freien Fall die Messebene passieren, und wertet die Messdaten intern in 255 Größenklassen aus. Die Kopplung beider Messsysteme ermöglicht eine Auswertung der Korngrößenverteilung des gesamten Kornbandes von 1 µm bis 2 mm. Eine Approximation erfolgt über die Verteilungsfunktion nach Fuller:

$$Q_3(x) = \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^n \quad [-]$$

Der Exponent n charakterisiert die Breite der Verteilung. Mit ansteigendem n (Natursande) wird die Verteilung enger, d.h. die Durchgangskennlinie $Q_3(x)$ wird steiler. Brechsande haben eine breite Korngrößenverteilung und somit einen niedrigen Fuller-Exponenten.

Die Packungsdichte PD charakterisiert die relative Raumauffüllung eines Schüttgutes und lässt sich aus dem Quotienten aus Rohdichte und Rütteldichte berechnen:

$$PD = \frac{\rho_{rüttel}}{\rho_{roh}} \quad [-]$$

Die Rütteldichte wurde mit dem Pulverpyknometer GeoPyk 1360 der Firma Micromeritics bestimmt. Die Ermittlung der Kornformverteilung erfolgte im Feinbereich < 400 µm mittels fotooptischer statischer Bildanalyse an dem Gerät Morphologi G3S der Firma Malvern (Morphologi) und im Grobbereich > 400 µm mittels fotooptischer dynamischer Bildanalyse an dem Gerät CPA (s.o.). Im Gegensatz zur dynamischen Bildanalyse, wo die Partikel in willkürlicher Ausrichtung vorliegen und u.U. auch in Drehbewegung aufgenommen werden, zeichnet sich die statische Bildanalyse durch die Erfassung von nicht-bewegten Partikeln aus. Das Morphologi ermöglicht durch seine genau einstellbare Schärfentiefe und hohe Auflösung die Beschreibung der Kornform von Partikeln bis zu einer Größe von 1 µm im Nass- oder Trockenverfahren. Bei der Trockendispergierung wird das Probenmaterial mittels Druckluft auf den Objektträger aufgebracht und anschließend mit der hochauflösenden Kamera jedes Partikel einzeln erfasst und abgespeichert. Wichtige Kornformparameter beider Verfahren werden im Folgenden kurz dargestellt:

Kornformparameter	CPA (dynamische BA)	Morphologi (statische BA)
Kornform	Sphärizität $SPHT = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{U^2}$	High Sensitivity Circularity $HS\ circ = SPHT$
Oberflächenbeschaffenheit	Rauigkeit $R = \frac{mittl.Zirk.}{mittl.L/B}$	Convexity $con = \frac{U_{Hülle}}{U}$ Solidity $sol = \frac{A}{A_{Hülle}}$
Länge/Breite-Verhältnis	L/B	Aspect ratio $AR = B/L$ Elongation $El = 1 - AR$

Für die Mörtelmischungen wurde hinsichtlich der Vergleichbarkeit der verschiedenen Gesteinskörnungsarten eine Basismischung mit konstanter Menge an Zement, Sand und Wasser ($w/z = 0,6$) festgelegt. Der Feinanteil, der sich aus dem Mehlkorn des Sandes und zusätzlich zugefügter Steinkohlenflugasche zusammensetzt, wird ebenso konstant gehalten. Variiert wurde die Zusammensetzung des Feinanteils ($< 125 \mu\text{m}$) des Sandes in folgender Weise:

- 1) Brechsand mit Mehlkorn und Steinkohlenflugasche BSmMK (+SFA)
- 2) Natursande mit Mehlkorn und Steinkohlenflugasche NSmMK +SFA
- 3) Brechsand ohne Mehlkorn mit Steinkohlenflugasche BSoMK+SFA
- 4) Natursand ohne Mehlkorn mit Mehlkorn eines Brechsandes NSoMK+MK
BS

Modellmischung 1) und 2) bestehen jeweils aus den Gesamtkornbändern der drei Natur- (NS) und drei Brechsande (BS), wie sie in den Lagerstätten ohne nachträgliche Bearbeitung aufzufinden sind. Mittels Steinkohlenflugasche wird der variierende Mehlkornanteil der Sande auf einen für alle Mischungen konstanten Feinkornanteil aufgefüllt. Modellmischungen 3) und 4) stellen die Substitutionsrezepturen dar: In Mischung 3) wurden die Mehlkornanteile der Brechsande durch 100% Steinkohlenflugasche und in Mischung 4) die Mehlkornanteile der Natursande durch den Mehlkornanteil eines ausgewählten Brechsandes ersetzt.

Ziel war es, den Einfluss der Kornform des Gesamtkornbandes auf die Verarbeitungseigenschaften der Mörtelmischungen durch gezielte Substitution des Feinanteils herauszustellen. Um ein Fließen aller Mörtelmischungen zu ermöglichen, wurde die Fließmittelmenge je nach Bedarf angepasst und ein konstantes Ausbreitfließmaß von $24,5 \pm 1 \text{ cm}$ eingestellt. Die rheologischen Messungen wurden mit dem VISKOMAT NT der Firma SCHLEIBINGER mit der von Prof. Vogel entwickelten Korbzelle für Mörteluntersuchungen durchgeführt.

Messergebnisse

Der bereits bekannte Zusammenhang zwischen Packungsdichte, Fuller-Exponenten und Kornform der Gesteinskörnungen konnte auch unter Verwendung der neuen Messgeräte (für Packungsdichte und Kornform) nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit der Packungsdichte vom Fuller-Exponenten ist in Abb. 1 dargestellt. Die Packungsdichte steigt mit sinkendem Fuller-Exponenten, d.h. breiter werdender Korngrößenverteilung bis zu einem Maximalwert von 0,84. Die höchsten Packungsdichten werden von den Modellmischungen erreicht, deren Feinanteil vollständig aus SFA bestand (2) und 3)). Die Packungsdichte sinkt mit steigendem Fuller-Exponenten, bis hin zu den niedrigsten Packungsdichten von 0,69 der Modellmischungen, deren Feinanteil sich vollständig aus Brechsandmehl Korn zusammensetzte. Dies begründet sich darin, dass die SFA einen größeren Volumenanteil $\leq 20 \mu\text{m}$ besitzt als Brechsandmehl Korn (siehe Abb. 2) und somit die Modellmischungen mit einem hohen SFA-Gehalt breiter verteilt sind als jene mit einem hohen Brechsandmehl Korn-Gehalt.

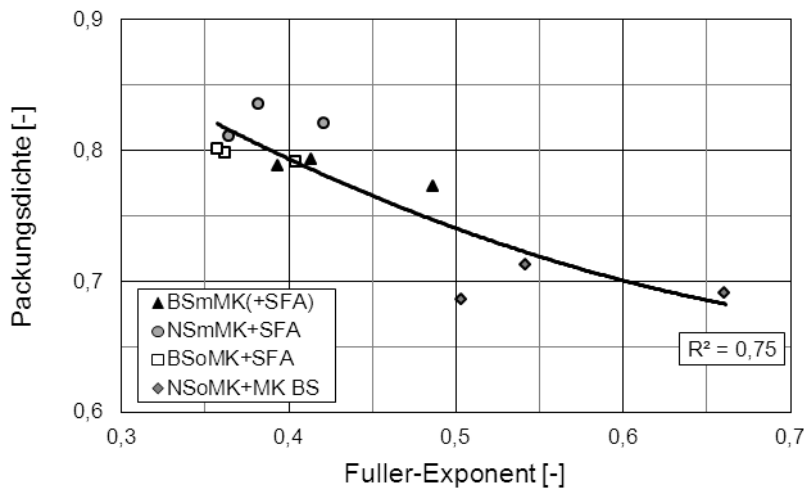


Abb. 1:
Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Packungsdichte

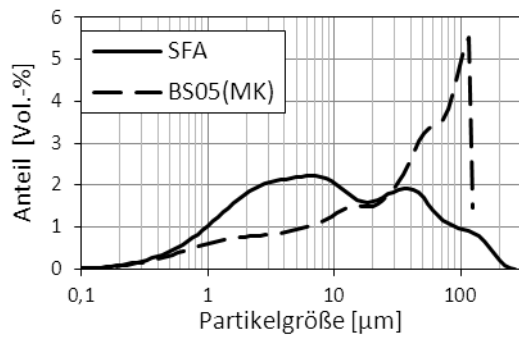


Abb. 2: KGV der SFA und eines BSmehlkorns

Weiterhin ist der Einfluss des Feinanteils deutlich erkennbar. Bei den Natursanden fällt die Packungsdichte durch die Substitution der SFA durch Brechsandmehlkorn vom Maximum (●-Punkte) bis zum Minimum (◆-Punkte) ab. Dieser Trend ist auch bei den Brechsanden ähnlich, jedoch nicht so ausgeprägt, da die drei Brechsande zur Auffüllung des Mehlkorns SFA besitzen. Die Ursache ist neben den unterschiedlichen Korngrößenverteilungen auch in den unterschiedlichen Kornformen zu finden. In Abb. 3 wird dies an dem Kornformparameter HS circularity, welcher dem DIN-Kennwert der Sphärizität entspricht, deutlich.

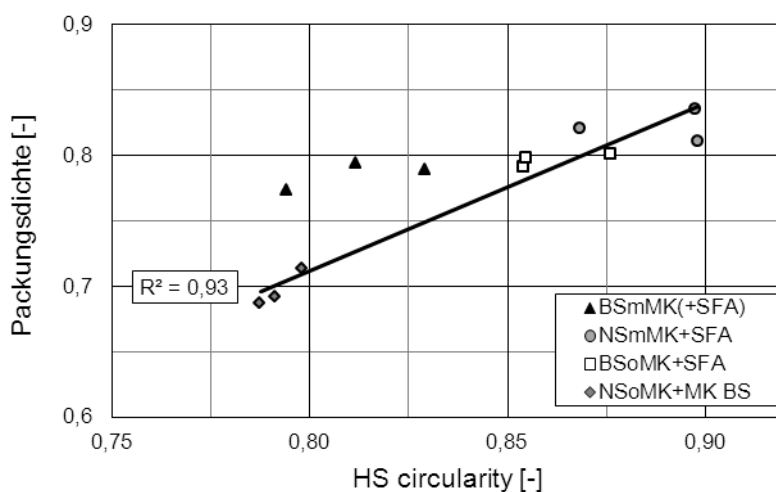


Abb. 3:
Einfluss der Kornform $\leq 400 \mu\text{m}$ auf die Packungsdichte

Es ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Rundheit (Sphärizität) der Partikel und der Packungsdichte. Je runder die Partikel (hohe

HS circularity) sind, umso größer wird die Packungsdichte. Die höchsten Werte erreichen die Modellmischungen aus Natursand und Steinkohleflugasche.

Da die HS circularity nur bis zu einer Korngröße von $\leq 400 \mu\text{m}$ gemessen wurde, beeinflusst der Feinanteil der Modellmischungen die Auswertung maßgeblich. Die mittlere Rundheit der Modellmischungen sinkt von den Maximalwerten der Modellmischungen aus Natursand + SFA, über Brechsand + SFA, bis zu den Minimalwerten der Modellmischungen aus Natursand + MK Brechsand. Die Mischungen aus Brechsand mit Mehlkorn fügen sich nicht in die Trendkurve ein, da sie zur Auffüllung des Feinanteils je nach Mehlkornanteil auch Steinkohleflugasche besitzen und diese sowohl die Rundheit, als auch die Packungsdichte der Gesamtmischung maßgeblich beeinflusst.

Die Packungsdichte beeinflusst als Bindeglied zwischen der Granulometrie des Schüttgutes und der Gefügeoptimierung des Mörtels maßgeblich die Verarbeitungseigenschaften der Frischmörtel. Abb. 4 zeigt den Einfluss der Packungsdichte auf die ermittelte Fließmittelmenge bei gleichem Ausbreitfließmaß. Mit zunehmender Packungsdichte der eingesetzten Sande sinkt die benötigte Fließmittelmenge. Zudem verringert sich der Fließmittelbedarf bei einer runderen Kornform des Mehlkornanteils. So benötigen die Mörtelmischungen aus Natursanden mit Brechsandmehl Korn das meiste Fließmittel mit bis zu 2,6 M.-% vom Zement und analog dazu die Mörtelmischungen mit Natursand und Steinkohleflugasche am wenigsten Fließmittel (0,70 M.-% vom Zement). Als Fließmittel wurde bei allen Mörtelmischungen ein Polycarboxylatether eingesetzt.

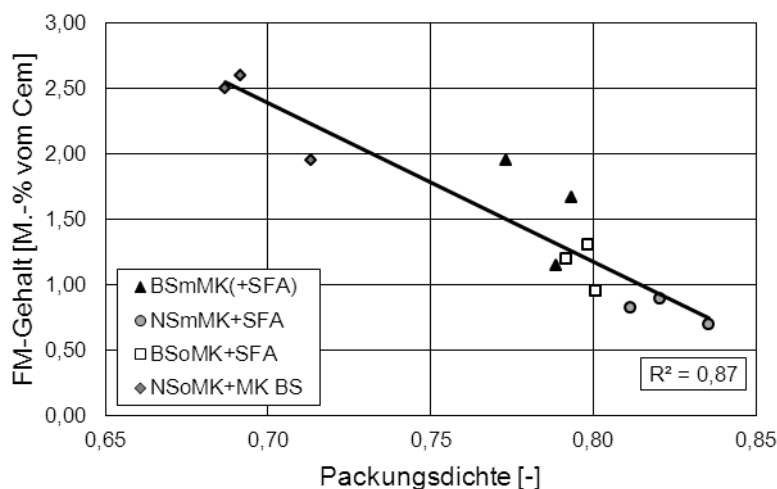
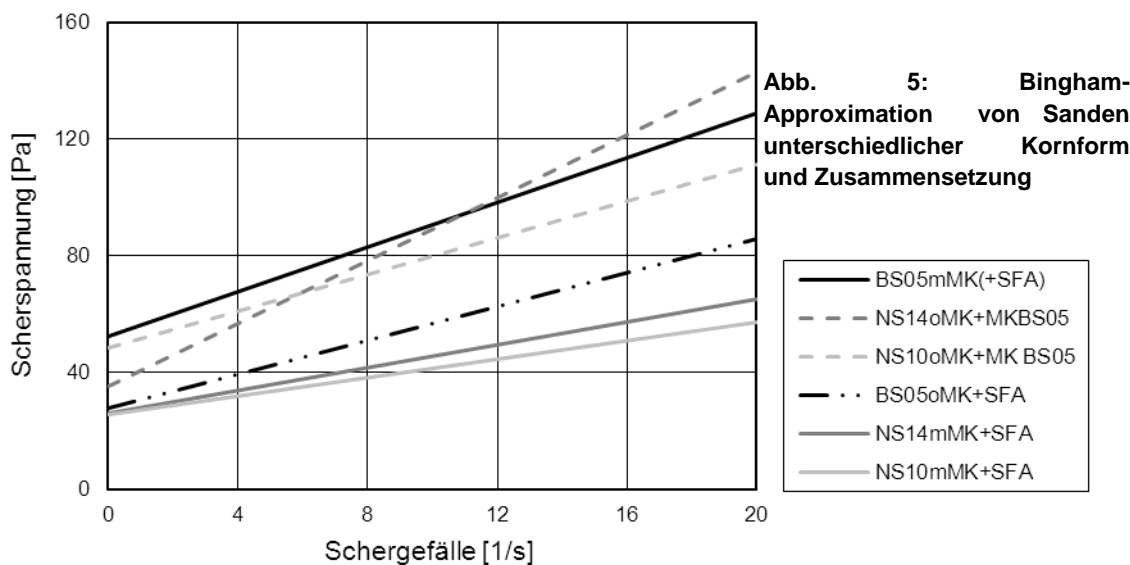


Abb. 4: Einfluss der Packungsdichte auf den Fließmittelgehalt

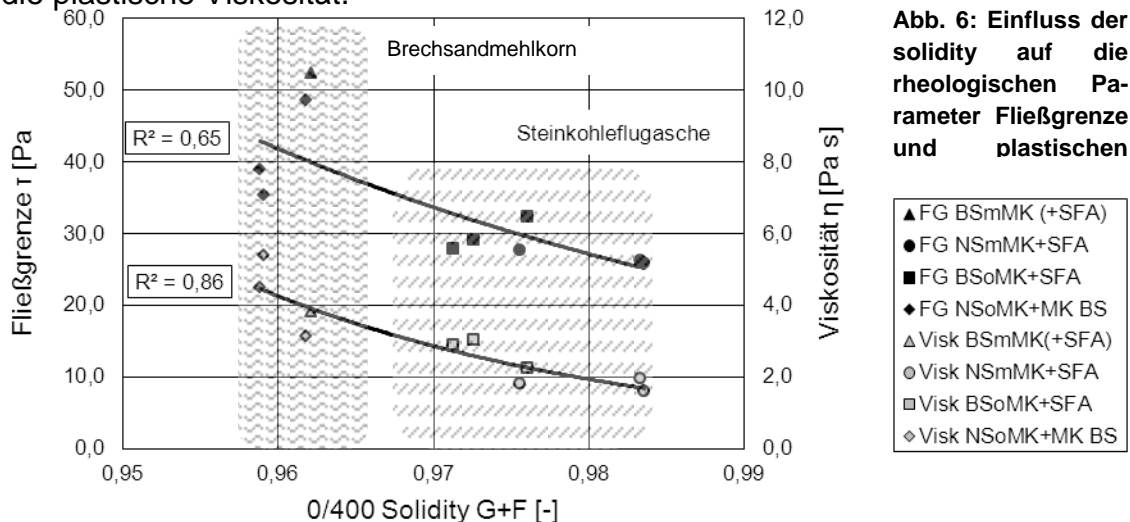
Bei den rheologischen Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Mörtelmischungen zwar alle auf ein Ausbreitfließmaß von $24 \pm 1 \text{ cm}$ eingestellt waren, im Rheometer sich jedoch sehr unterschiedlich verhielten. So konnten einige Modellmischungen aus Brechsanden nicht gemessen werden, da die Zähigkeit der Mörtel das maximal aufnehmbare Drehmoment des Viskomat NT überschreiten ließ. Das Fließverhalten der messbaren Mörtelmischungen konnte mit dem Fließgesetz nach Bingham $\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$ charakterisiert werden. Abb. 5 stellt jeweils die Mittelwerte aus drei Einzelmessungen unterschied-

licher Beispiele der Modellmischungen dar.



Die Staffelung der Modellmischungen zeigt auch bei den rheologischen Parametern Fließgrenze und plast. Viskosität eindeutige Trends. Die Mörtel aus Natursanden und SFA erzielen die niedrigsten Fließgrenzen und plast. Viskositäten und die Mörtel aus Brechsanden mit Mehlkorn die höchsten Werte beider Parameter. Die Substitution des Feinanteils zeigt sehr unterschiedliche Wirkungen. Bei Brechsandmörteln bewirkt der Austausch des Mehlkorns durch Steinkohlenflugasche ein starkes Absinken der Fließgrenze und kaum Veränderung hinsichtlich der plast. Viskosität. Bei Mörtel aus Natursanden bewirkt die Zugabe von Brechsandmehl Korn entweder einen starken Anstieg der Fließgrenze bei relativ gleichbleibender plast. Viskosität (NS 10) oder einen starken Anstieg der plast. Viskosität bei gering erhöhter Fließgrenze (NS 14).

Bei der Auswertung der rheologischen Messungen wurde deutlich, dass die Kenngrößen der Kornform sehr gute Korrelationen zu den rheologischen Eigenschaften aufweisen. Die beste Korrelation erreicht der Kornformparameter Solidity, welche die Kantigkeit oder auch Rauigkeit eines Korn beschreibt. Je unregelmäßiger die Partikeloberfläche ist, umso höher wird die Fließgrenze und die plastische Viskosität.



Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Art des Feinanteils $< 125 \mu\text{m}$ eines Sandes einen maßgeblichen Einfluss auf das Gesamtkornband und somit auf die Verarbeitungseigenschaften eines SVB-Mörtels hat. Die bekannten Zusammenhänge zwischen Packungsdichte, Korngrößenverteilung und Kornform von Sanden konnte durch die Substitution des Feinanteils untermauert und erweitert werden. Die Packungsdichte und die Art des Feinanteils beeinflussen den Fließmittelbedarf und die rheologischen Eigenschaften gleichermaßen. Jedoch kann abschließend festgehalten werden, dass die Kornform und Korngrößenverteilung des Feinanteils einer Gesteinskörnung einen sehr großen Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften eines SVB-Mörtels hat – maßgeblicher noch als die Granulometrie des Grobkorns (125 μm bis 2 mm).

Literatur

- [1] Stark, U.; Müller, A.; Ostheeren, K.: *Kornform der feinen Gesteinskörnung und Rheologie der Basismörtel Selbstverdichtender Betone*, 17. IBAUSIL, 2009, Band 1, S. 1015-1033
- [2] Ostheeren, K.; Stark, U.; Müller, A.: *Die Zukunft der Brechsande? Einfluss der Kornform von Sanden auf die Verarbeitungseigenschaften von SVB-Mörteln*, AT-Mineral Processing-Aufbereitung Mineralische Stoffe 1-2/2011, S.52-59
- [3] Laub, K.: *Untersuchungen zum Einfluss des Mehlkornanteils und der Kornform ausgewählter Sande auf die Rheologie von SVB-Mörteln*, Master-Arbeit an der Bauhaus-Universität Weimar, in Arbeit

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Katrin Ostheeren
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystraße 7
99423 Weimar

katrin.ostheeren@uni-weimar.de