



*Dipl.-Ing. Katrin Ostheeren
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/*

Katrin Ostheeren studierte an der Bauhaus-Universität Weimar mit Schwerpunkt auf den Bereich „Baustoffe und Sanierung“. Seit Mai 2008 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, tätig. Den im September 2010 neu gegründeten Verein „Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung e.V.“ leitet sie als Geschäftsführerin.

*Dr.-Ing. Ursula Stark (im Ruhestand)
Bauhaus-University of Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/*

*Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Bauhaus-University of Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/*

Die Zukunft der Brechsande? The future of crushed sands?

Einfluss der Kornform von Sanden auf die Verarbeitungseigenschaften von SVB-Mörteln

Zusammenfassung: Im vorliegenden Beitrag wird als Ergebnis umfangreicher Untersuchungen eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe der Einsatz von Brechsanden in SVB-Mörteln vorausbestimmt werden kann. Der beschriebene Algorithmus stellt eine erste Grundlage für ein empirisches Modell dar, welches auf der Basis von Analyseergebnissen zur Kornform und Korngrößenverteilung der Ausgangssande Aussagen über die Verarbeitbarkeit von SVB-Mörteln erlaubt. Die entscheidenden Parameter sind der Fuller-Exponent n der Korngrößenverteilung sowie die Formparameter Sphärität und Rauigkeit.

Influence of the sand grain shape on the working properties of SCC mortars

Summary: In this paper, as the culmination of extensive tests, a method is presented which can be used to estimate the behaviour of crushed sands in SCC mortars in advance. The algorithm described provides an initial basis for an empirical model that enables the derivation of information on the working properties of SCC mortars from only the results of analysis of the grain shape and grain size distribution of the starting sands. The key parameters are the Fuller exponent n of the grain size distribution and the shape parameters sphericity and roughness.



Brechsandhalden in einem Steinbruch • Dumps of crushed sands at a quarry

1 Einleitung

Brechsande entstehen als zumeist unerwünschtes Nebenprodukt bei der Herstellung von Schotter und Splitt in Anteilen bis zu 20 %. Bei der Verwendung von einfachen Zerkleinerungsverfahren werden Brechsande mit einem Mehlkornanteil von 15–25 M.-% „nebenproduziert“. Eine qualitativ hochwertige Verwendung finden sie nur unter kostenintensiver Optimierung des gesamten Zerkleinerungs- und Verarbeitungsprozesses. Je nach regional bedingtem Förderangebot werden sie jedoch gegenwärtig entweder auf Halden deponiert oder für untergeordnete Bodenverfüllungen, als Kabelsande oder in Frostschutzschichten verwendet.

Der zunehmende Einsatz und die Weiterentwicklung von Selbstverdichtenden Betonen (SVB), sowie die Sensibilisierung der Bauindustrie für die ökonomische und ökologische Verwendung von bestehenden Umweltressourcen eröffnen dem Brechsand einen neuen Nutzungsbereich. Die spezifischen Eigenschaften von Selbstverdichtendem Beton, wie hohe Fließfähigkeit und selbstständiges Entlüften, werden durch einen hohen Anteil an Füllerkomponenten mit einer Korngröße $< 125 \mu\text{m}$ und dem Einsatz von Fließmitteln realisiert. Derzeit werden als Füller vorrangig Flugaschen und Silikastaub mit einer möglichst runden Kornform und

1 Introduction

Crushed sands are usually a by-product of the production of ballast and chippings, accounting for up to 20 % of the yield. With simple comminution methods, crushed sands with a fine grain content of 15–25 mass % are produced “by the way”. They are only used in high-grade applications providing the entire comminution and processing flow undergoes cost-intensive optimization. Depending on the regionally dependent availability of extracted materials, however, they are currently either just dumped or used for inferior backfilling, as cable sands or in frost protection courses.

The increasing use and further development of self-compacting concretes (SCC), as well as growing awareness of the construction industry of the economic and ecological use of existing environmental resources have opened up a new range of application for crushed sands. The specific properties of self-compacting concrete, such as high flowability and independent deaeration, are realized with a high content of filler components with a grain size $< 125 \mu\text{m}$ and the use of plasticizer. Currently mainly fly ash and silica dust with a grain shape as round as possible are used as filler and natural sands are used as fine aggregate. In addition, the packing density, which is primarily influenced by the grain size dis-

als feine Gesteinskörnung Natursande eingesetzt. Zudem wurde die Packungsdichte, welche vorrangig durch die Korngrößenverteilung des Schüttgutes, aber auch durch die Kornform der Einzelpartikel beeinflusst wird, häufig als einziges Merkmal zur summarischen Beschreibung aller granulometrischen Kennwerte genutzt. Mit der Entwicklung neuer Messtechniken zur Bestimmung der Kornform und Korngröße können diese Zusammenhänge sowohl für grobe als auch für feine Gesteinskörnungen quantitativ erfasst werden.

2 Granulometrische Kenngrößen

Die Untersuchung der Kornform und der Korngröße wurde an 60 verschiedenen Sanden mit dem am Lehrstuhl Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung (ABW) vorhandenen fotooptischen Partikelanalyzesystem HAVER CPA 4-2 real time (im folgenden CPA genannt) von HAVER & BOECKER [1] durchgeführt. Nach dem Prinzip der dynamischen Bildanalyse erfasst das Gerät die Partikel, die im freien Fall die Messebene passieren, mit einer Zeilenkamera im Gegenlichtmodus und wertet die Messdaten intern in 255 Größenklassen aus. Folgende Kornformparameter sind für die weiteren Ausführungen von Bedeutung:

$$\text{Sphärizität nach ISO 9276-6.2: } \text{SPHT} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{U^2} \quad [-]$$

$$\text{Rauigkeit: } R = \frac{\text{mittl. Zirk}}{\text{mittl. } L/B} \quad [-]$$

Die Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit erfolgte in Anlehnung an die geräteinterne Definition des CPA über den Parameter der Rauigkeit. Diese wird je Kornklasse über den Quotienten der mittleren Zirkularitäten (Zirk = $U/2 \cdot [\pi \cdot A]^{0.5}$) zu den mittleren L/B-Verhältnissen berechnet. Bei diesem Ansatz wird die Rauigkeit in Abhängigkeit von zwei Parametern ausgedrückt – der Oberflächenrauigkeit und der Kornform. Der Idealzustand ist hierbei durch eine „glatte Kugel“ definiert und hat den Wert $R = 1$. Reale Körnungen erzielen Werte < 1 .

Die Kornform der Sande konnte bis zu einer Korngröße von $400 \mu\text{m}$ in guter Qualität abgebildet werden und etwa bis zu $100 \mu\text{m}$ angenähert werden. Die Korngröße konnte bis zu einer Größe von $100 \mu\text{m}$ mit dem CPA-Gerät gemessen werden. Die Charakterisierung des Bereiches $< 100 \mu\text{m}$ beschränkte sich in den bisherigen Arbeiten auf die Trennung der Sandproben bei $100 \mu\text{m}$ und einer Einzelmessung bei $63 \mu\text{m}$ mittels Luftstrahlsiebung. Eine solche Charakterisierung ist jedoch bei bis zu 25 % Feingutanteil nicht repräsentativ für eine Korngrößenverteilung. Deshalb wurde in weiteren Untersuchungen für den Feinanteil die Laserbeugungsanalyse mit dem Korngrößenmessgerät Coulter LS 230 der Firma Beckman-Coulter (nachfolgend als Coulter bezeichnet) verwendet.

Dieses Messgerät arbeitet mit 2 Messzellen, die nacheinander von der Probe durchströmt werden. Damit werden 2 Messprinzipien – die Laserbeugung im Fraunhofer-Bereich und die Lichtstreuung im Mie-Bereich (Korngrößen etwa $< 0,4 \mu\text{m}$) – miteinander gekoppelt und ein Messbereich von $0,040 \mu\text{m}$ bis $2000 \mu\text{m}$ in 116 Größenklassen ermög-

tribution of the bulk solid, but also by the particle shape of the individual grains, was frequently used as sole characteristic for the summary description of all granulometric characteristics. With the development of new measurement methods for determining the grain shape and grain size, these relationships can be quantitatively analysed both for coarse and fine aggregates.

2 Granulometric characteristics

The grain shape and grain size of 60 different sands were analysed with the HAVER CPA 4-2 real time photooptical particle analysis system (referred to as CPA in the following) supplied by HAVER & BOECKER [1], which is installed at the Department of Building Materials Processing and Recycling (ABW). According to the principle of dynamic image analysis, the system analyses particles as they free-fall past the measurement plane with a line camera in backlight mode and internally breaks down the measured data into 255 size classes. The following grain shape parameters are important for the further explanations:

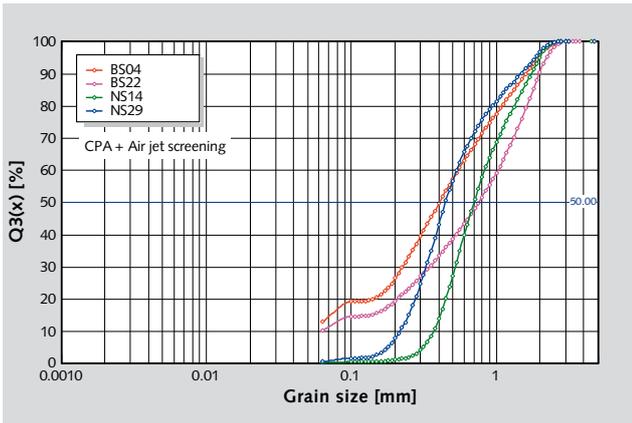
$$\text{Sphericity according to ISO 9276-6.2: } \text{SPHT} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \quad [-]$$

$$\text{Roughness: } R = \frac{\text{mean circ}}{\text{mean } L/W} \quad [-]$$

The surface properties were described based on the system-internal definition of the CPA using the roughness parameter. This is calculated for each particle size class with the quotient of the mean circularities ($\text{circ} = P/2 \cdot [\pi \cdot A]^{0.5}$) and the mean L/W ratios. With this model, the roughness is expressed as a function of two parameters – the surface roughness and the grain shape. The ideal condition is defined based on a “smooth ball” and has the value $R = 1$. Real aggregates achieve values < 1 .

The grain shape of the sands could be imaged in good quality up to a grain size of $400 \mu\text{m}$ and approximated up to around $100 \mu\text{m}$. The grain size could be measured up to a size of $100 \mu\text{m}$ with the CPA system. Characterization of the size range $< 100 \mu\text{m}$ was limited in previous research to separation of the sand samples at $100 \mu\text{m}$ and a single measurement at $63 \mu\text{m}$ by means of air jet sieving. For materials with up to 25 % fines, however, such a characterization is not representative for a grain size distribution. Therefore in further studies, for the fines, laser diffraction analysis with the Coulter LS 230 particle sizer supplied by Beckman-Coulter (referred to as Coulter in the following) was used.

This sizer operates with two measurement cells through which the sample flows consecutively. This enables a combination of two measurement principles – laser diffraction in the Fraunhofer range and light scattering in the Mie range (grain sizes around $< 0.4 \mu\text{m}$), and a measuring range from $0.040 \mu\text{m}$ to $2000 \mu\text{m}$ in 116 size classes. Deionized water with electrolyte addition was used as measurement fluid. Dispersion was performed with ultrasound. In previous laboratory tests, comparison of results of the CPA and the Coulter analyses resulted in good agreement of the measured



1 Korngrößenverteilung unter Kopplung der Ergebnisse des CPA und der Luftstrahlsiebung

Grain size distribution with combination of the results of the CPA and air jet screening

licht. Als Messflüssigkeit wurde deionisiertes Wasser mit Elektrolytzusatz verwendet. Die Dispergierung erfolgte mit Ultraschall. Ein Vergleich von Messergebnissen der CPA- und der Coulter-Analyse ergab in vorausgegangenen Laboruntersuchungen eine gute Übereinstimmung der gemessenen Korngrößenverteilungen auch für nicht-kugelförmige Teilchen. Für die Auswertung der Korngrößenverteilung des gesamten Kornbandes erfolgte daher eine Kopplung der Messergebnisse des CPA ($> 100 \mu\text{m}$) und des Coulter ($< 100 \mu\text{m}$) mit einem Überlappungsbereich von $\pm 25 \mu\text{m}$ mit der Software PMPcompact der Firma Grainsoft. Insbesondere für die Korngrößenverteilung der Brechsande mit hohen Feinanteilen lieferte diese Vorgehensweise neue Ergebnisse. In Bild 1 und Bild 2 sind die Korngrößenverteilungen aus CPA-Analyse und Luftstrahlsiebung und diese aus CPA- und Coulter-Analyse anhand von ausgewählten natürlichen und gebrochenen Gesteinskörnungen dargestellt.

Beschrieben wird die Korngrößenverteilung über die Verteilungsfunktion nach Fuller:

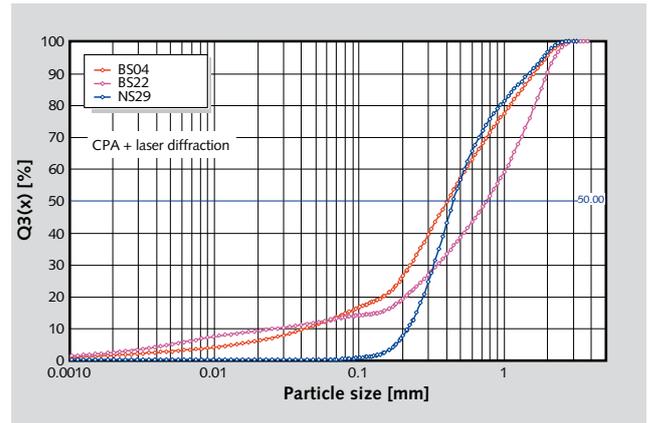
$$\text{Fuller-Verteilung: } Q_3(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^n \quad [-]$$

Der Exponent n charakterisiert die Breite der Verteilung. Mit ansteigendem n (Natursande) wird die Verteilung enger, d.h. die Durchgangskennlinie wird steiler. Brechsande haben eine breite Korngrößenverteilung und somit einen niedrigen Fuller-Exponenten. Aufbauend auf der Erweiterung der Korngrößenverteilung mittels Coulter-Analyse konnte die Berechnung des Fuller-Exponenten auf das gesamte Kornband bis zu einer Korngröße von $0,04 \mu\text{m}$ erweitert werden. Der Vergleich der Auswertung der Korngrößenverteilung nach Fuller zeigt eine deutliche Veränderung der n -Werte.

Die Packungsdichte PD charakterisiert die relative Raumaufüllung eines Schüttgutes und berechnet sich wie folgt:

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

Für die Bestimmung der Rütteldichte wurden die Sande 60 s durch vertikales Rütteln ohne Auflast verdichtet. Die



2 Korngrößenverteilung unter Kopplung der Ergebnisse des CPA und des Coulter

Grain size distribution with combination of the results of the CPA and the Coulter

grain size distributions even for non-spherical grains. For the evaluation of the grain size distribution of the entire grain size range, the measuring results of the CPA ($> 100 \mu\text{m}$) and the Coulter ($< 100 \mu\text{m}$) were combined with an overlap of $\pm 25 \mu\text{m}$ using the PMPcompact software supplied by Grainsoft. Particularly for the grain size distribution of the crushed sands with high fine content, this procedure returned new results. In Fig. 1 and Fig. 2, the grain size distributions from the CPA analysis and air jet sieving and those from the CPA and Coulter analyses are shown based on selected natural and crushed aggregates.

The grain size distribution is described with Fuller's distribution function:

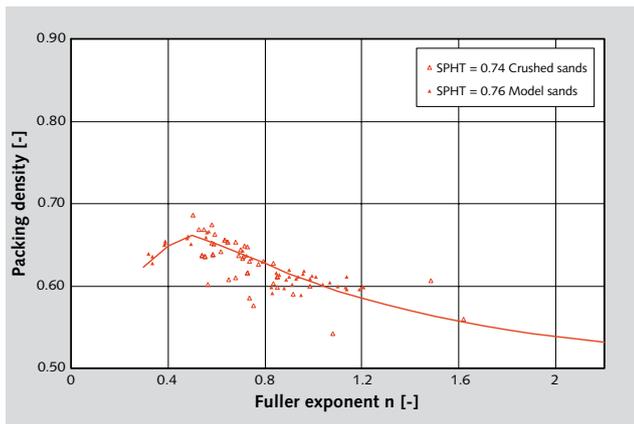
$$\text{Fuller distribution: } Q_3(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^n \quad [-]$$

The exponent n characterizes the width of the distribution. With increasing n (natural sands), the distribution becomes narrower, i.e. the undersize curve becomes steeper. Crushed sands have a wide grain size distribution and therefore a low Fuller exponent. Working on the extension of the particle size distribution by means of Coulter analysis, calculation of the Fuller exponent could be extended to the entire grain size range to a grain size of $0.04 \mu\text{m}$. The comparison of the evaluation of the grain size distribution after Fuller shows a considerable change in the n -values.

The packing density PD characterizes the relative space filling of a bulk solid and is calculated as follows:

$$\text{Packing density: } PD = \frac{\rho_{\text{tap}}}{\rho_{\text{particle}}} \quad [-]$$

For determination of the tap density, the sands were compacted for 60 s by means of vertical vibration without applied load. The advantages of the combination of photo-optical image analysis and laser diffraction analysis and therefore of the representative characterization of the grain size distribution are shown clearly in Fig. 3 and in Fig. 4 especially for crushed sands. On plotting of the packing density as a function of the Fuller exponent, which was deter-



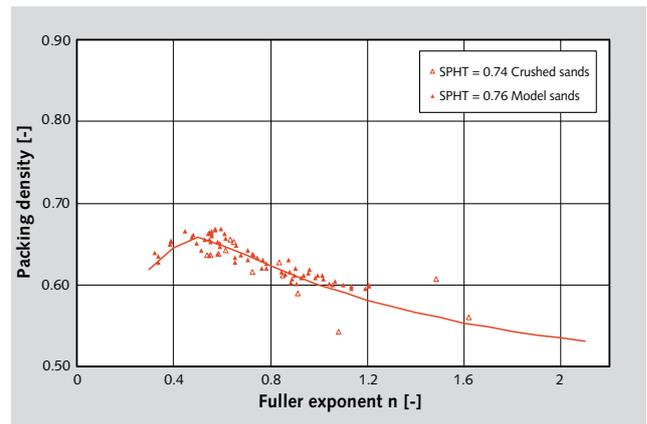
3 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Fullerexponent n – entspricht Bild 1

Relationship between packing density and Fuller exponent n – corresponds to Fig. 1

Vorteile der Kopplung der fotooptischen Bildanalyse und der Laserbeugungsanalyse und damit der repräsentativen Charakterisierung der Korngrößenverteilung werden in **Bild 3** und **Bild 4** besonders für die Brechsande deutlich. Bei Auftragung der Packungsdichte in Abhängigkeit vom Fullerexponenten, der für den gesamten Partikelgrößenbereich von $0,04 \mu\text{m}$ bis zur Maximalkorngröße x_{max} ermittelt wurde, unterliegen die Messpunkte weit geringeren Schwankungen als vorher und fügen sich sehr gut in den Trend ein.

Die eingetragenen Kurven wurden mit der Gleichung von Peronius und Sweeting [2] berechnet, die auf Ergebnissen von Fuller mit Formfaktoren von Powers basiert. Die Packungsdichten aller Natur- und Brechsande sowie hergestellter Sandmischungen aus Natur- und Brechsanden sind in nachfolgendem Diagramm dargestellt. Diese Kurven korrelieren gut mit den gewonnenen Messergebnissen. Einerseits steigt die Packungsdichte unabhängig von der Kornform mit sinkendem Verteilungsexponenten bis zu einem maximalen Wert bei einem n von etwa 0,5 an. Andererseits steigt sie ebenso mit der Rundheit der Partikel, d.h. mit Zunahme der Sphärizitäten. Das bedeutet für die untersuchten Sande, dass hohe Packungsdichten sowohl für Sande mit engen Korngrößenverteilungen und gut gerundeten Kornformen (hohe SPHT), als auch für Sande mit niedrigen Fullerexponenten n und niedrigen SPHT-Werten erreicht werden.

Die Werte von Sandmischungen lassen sich je nach Mischungszusammensetzung den entsprechenden Kurven nach Peronius und Sweeting zuordnen (**Bild 5**). Bei dem Mischungsverhältnis von 50 % NS und 50 % BS stimmen sie sehr gut mit der mittleren Kurve, welche für Natursande mit einer niedrigeren Sphärizität (0,82) Anwendung findet, überein. Bei dem Mischungsverhältnis von 80 % NS und 20 % BS liegen sie im Feld der Messwerte, das für die Sphärizität von 0,86 gilt, also die gut gerundeten Natursande. Die Verschiebung der Messwerte in Richtung geringerer Sphärizitätswerte ist plausibel, weil sich mit Zunahme des Brechsandanteils die Sphärizität des Gemisches verringert.



4 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Fullerexponent n – gemessen mit CPA und Laserbeugung

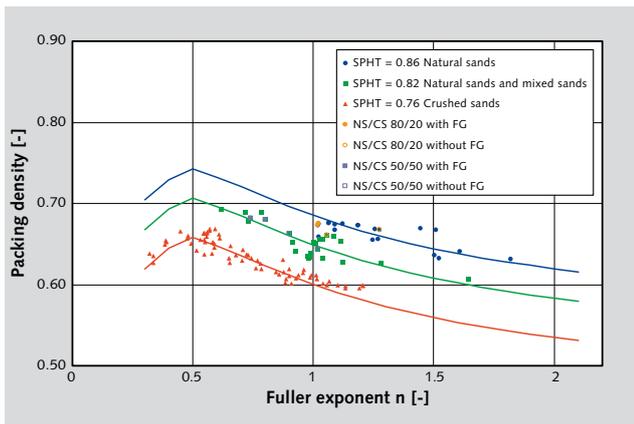
Relationship between packing density and Fuller exponent n – measured with CPA and laser diffraction

mined for the entire particle size range from $0.04 \mu\text{m}$ to the maximum particle size x_{max} , the measured points are subject to far smaller variations than before and fit very well with the trend.

The plotted curves were calculated with the equation of Peronius and Sweeting [2], which is based on Fuller's results with Powers' shape factors. The packing densities of all natural and crushed sands as well as of blends of natural and crushed sands are shown in the following diagram. These curves correlate well with the measured results. On the one hand, the packing density increases independently of the grain shape with falling distribution exponent to a maximum value at an n of around 0.5. On the other hand, it rises with the roundness of the particles, i.e. with increasing sphericity. For the sands analysed, this means that high packing densities are achieved for sands with narrow grain size distributions and well-rounded grain shapes (high SPHT) as well as for sands with low Fuller exponent n and low SPHT values.

Depending on the blend composition, the values for the sand blends can be assigned to the corresponding curves after Peronius and Sweeting (**Fig. 5**). At the mixing ratio of 50 % NS and 50 % CS, they fit well with the middle curve, which is used for natural sands with a relatively low sphericity (0.82). At the mixing ratio of 80 % NS and 20 % CS, they lie in the range of values measured for the sphericity of 0.86, that is the well-rounded natural sands. The shift of the measured values towards lower sphericity values is plausible because the sphericity of the blend decreases with the increasing content of crushed sand.

In comparison with the mixing ratio, the content of natural fine grain (FG) in the 80/20 % blends is of minor importance. With reference to the example of the 50/50 % blend, it is clear that the samples with fine grain achieve a wider grain size distribution and, as expected, higher packing densities than the 50/50 blends from which the fine grain content of the crushed sand has been sieved off and removed.



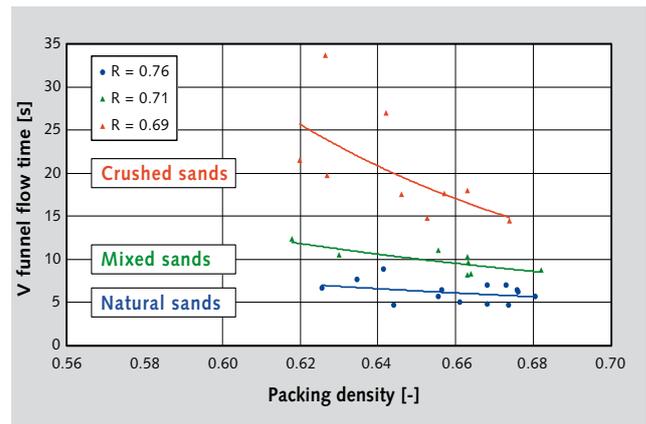
5 Messwerte für Natur- und Brechsande sowie Sandmischungen im Vergleich mit berechneten Kurven nach Peronius und Sweeting
Measured values for natural and crushed sands in comparison with the curves calculated after Peronius and Sweeting

Im Vergleich zum Mischungsverhältnis ist der Anteil an natürlichem Mehlkorn (MK) bei den 80/20 %-Mischungen von untergeordneter Bedeutung. Am Beispiel der 50/50 %-Mischung wird deutlich, dass die Proben mit Mehlkorn eine breitere Korngrößenverteilung und erwartungsgemäß auch höhere Packungsdichten erreichen, als die Mischungen 50/50, bei denen der Mehlkornanteil des Brechsandes abgeseibt und entfernt wurde.

3 Einfluss der granulometrischen Kenngrößen auf die Verarbeitbarkeit von SVB-Mörteln

Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Wirkung der Brechsande im Mörtel erkennbar zu machen, wurde für alle Mörteluntersuchungen eine Basisrezeptur festgelegt. Die Mischung enthält jeweils eine konstante Menge an Zement (CEM I 52,5 R), Sand (Körnung 0,125/2) und Wasser ($w/z = 0,6$). Die Menge des Mehlkornanteils, der aus Flugasche und dem Mehlkornanteil des jeweiligen Sandes besteht, wird ebenfalls konstant gehalten. Zur Beschreibung der Verarbeitungseigenschaften dienten sowohl die Ein-Punktmessverfahren Ausbreitfließmaß und Trichterauslaufzeit als auch rheologische Parameter, die mittels Rheometer bestimmt wurden. Dabei wurde zunächst die Fließfähigkeit der Mörtel durch Fließmittelzugabe auf ein definiertes Ausbreitfließmaß von $24,5 \pm 1$ cm eingestellt. Als Fließmittel kam für alle Mörtel ein Polycarboxylatether zum Einsatz.

Anhand der erforderlichen Fließmittelmenge ist somit ein Vergleich der eingesetzten Sande möglich. Mit kleiner werdender Packungsdichte der eingesetzten Sande steigt die Fließmittelmenge exponentiell an, bis kein Fließen mehr möglich ist (vgl. Bild 9 b). Mit der ermittelten Fließmittelmenge wurden anschließend Mörtelmischungen zur Bestimmung der Trichterauslaufzeit sowie für die rheologischen Messungen mit dem Viskomat NT der Firma Schleibinger mit dem Messeinsatz nach Prof. Vogel hergestellt [3]. Die Ergebnisse der Ein-Punktmessungen zeigen in Bild 6 den Einfluss der Packungsdichte auf die Trichterauslaufzeit bei gleichem Ausbreitfließmaß. Signifikant ist hier die Differenzierung der Messwerte in drei Kurvenscharen, in Abhängig-



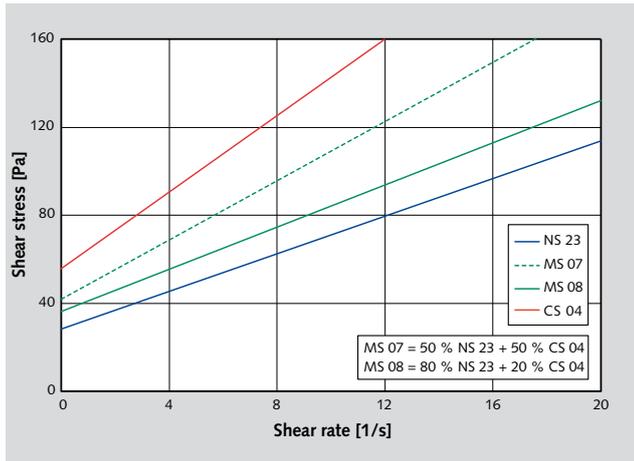
6 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Trichterauslaufzeit bei gleichem Ausbreitfließmaß
Relationship between the packing density and V funnel flow time at the same slump

3 Influence of the granulometric characteristics on the working properties of SCC mortars

To establish comparability in respect of the effect of the crushed sands in the mortar, for all mortar tests a base formulation was defined. The blend contains a constant quantity of cement (CEM I 52,5 R), sand (size 0.125/2) and water ($w/z = 0.6$). The amount of the fine grain content, which consists of fly ash and the fine grain content of the respective sand, is also kept constant. For description of the working properties, the single-point measurement methods slump and V-funnel flow time as well as the rheological parameters determined with a rheometer were used. The procedure was such that first the flowability of the mortar was adjusted to a defined slump of 24.5 ± 1 cm with the addition of a plasticizer. For all mortars, polycarboxylate ether was used as the plasticizer.

On the basis of the required amount of plasticizer, a comparison of the sands used is possible. With decreasing packing density of the sands used, the amount of plasticizer increases exponentially until flow is no longer possible (cf. Fig. 9 b). With the amount of plasticizer determined, mortar blends were then prepared for determination of the V-funnel flow time as well as for the rheological measurements with the Viskomat NT supplied by Schleibinger with the measurement insert after Prof. Vogel [3]. In Fig. 6, the results of the single-point measurements show the influence of the packing density on the V-funnel flow time at the same slump. Significant here is the differentiation of the measured values in three groups of curves, as a function of the roughness of the grains. The rougher the grains are, i.e. the lower their R value is, the longer the V-funnel flow time is. Further, it should be noted that with greater roughness of the grains, the packing density has a greater influence on the flowability than with grains with a smoother grain surface.

Fig. 6 also shows that, on the basis of the guide value of 10 s for the V-funnel flow time recommended by Okamura [4], the use of crushed sands alone cannot be considered for practical use, whereas partial substitution of natural sands with crushed sands is certainly possible (green curve). In the

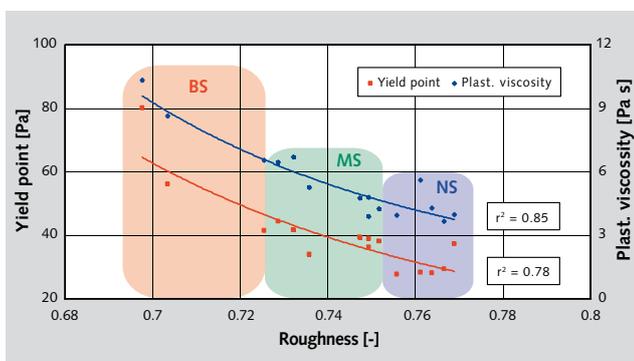


7 Bingham-Approximation von Beispielsanden mit unterschiedlicher Kornform

Bingham approximation of typical sands with different grain shape

keit von der Rauigkeit der Körner. Je rauer die Körner sind, d.h. je kleiner der Wert R ist, desto größer wird die Trichterauslaufzeit. Weiterhin ist festzuhalten, dass bei einer höheren Rauigkeit der Körner die Packungsdichte einen größeren Einfluss auf die Fließfähigkeit hat als bei Körnern mit einer glatteren Kornoberfläche.

Bild 6 zeigt weiterhin, dass nach dem von Okamura [4] empfohlenen Richtwert von 10 s für die Trichterauslaufzeit, der Einsatz von reinen Brechsanden für die praktische Nutzung nicht in Frage kommt, ein teilweiser Ersatz von Natursanden durch Brechsande aber durchaus möglich ist (grüne Kurve). Im Laufe der rheologischen Messungen mit dem Viskomat NT stellte sich heraus, dass aufgrund des Messbereiches des Rheometers nur Mörtel mit einer Trichterauslaufzeit bis zu 15 s gemessen werden konnten. Das Fließverhalten der analysierten Mörtel kann mit dem Fließansatz nach Bingham $\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$ charakterisiert werden. Die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität η_{pl} stellen die rheologischen Konstanten dieser Gleichung dar. Die gemittelte Fließkurve setzt sich je nach Sandart aus mindestens drei Einzelmessungen (für Brechsande waren mehre-



8 Einfluss der Rauigkeit auf die rheologischen Parameter Fließgrenze und plastische Viskosität

Influence of the roughness on the rheological parameters yield point and plastic viscosity

course of the rheological measurements with the Viskomat NT, it was established that owing to the measurement range of the rheometer, only mortars with a V funnel flow time up to 15 s could be measured. The flow behaviour of the analysed mortars can be characterized with the Bingham flow model $\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$. The yield point τ_0 and the plastic viscosity η_{pl} are the rheological constants of this equation. Depending on the type of sand, the averaged flow curve consists of at least three single measurements (for crushed sands, several measurements were necessary). Fig. 7 shows representative examples of this. The figure clearly shows that, depending on the sand used, the mortars exhibit different rheological parameters. That means mortars prepared with crushed sands achieve much higher values for the plastic viscosity and the yield point than mortars prepared with natural sands.

In the evaluation of the measured granulometric values, it became clear that the roughness is a key factor for influencing the rheological properties (Fig. 8). The correlations of the rheological parameters with the other granulometric characteristics sphericity and Fuller exponent are much lower so that an assignment to the sand types is only possible based on roughness. The roughness characteristic implies both the geometric dimensions of the grains as well as their sphericity.

4 Development of an empirical model

On the basis of the measured results for the grain shape and for the surface properties as well as the grain size distribution of the starting sands, in line with Fig. 9, it is possible to estimate the working properties of the SCC mortars to be produced in three steps. Necessary for this are only the granulometric parameters Fuller exponent n, calculated from the grain size distribution, as well as the particle shape sphericity and roughness. In the first step, using the Fuller exponent n and the sphericity from Fig. 9 a, the expected packing density can be derived. If the value determined for the packing density is lower than around 0.6, the required amounts of plasticizer and the V-funnel flow times increase steeply until the defined slump is reached. As the sands here are mainly crushed sands, these should only be used in blends with natural sands.

If the packing density is higher than 0.6, in the second step, the necessary amount of plasticizer is determined from Fig. 9 b. The values for the V-funnel flow times in Fig. 9 b already permit assessment for the practical use of the blend. Flow times > 11 s are unacceptable. In the last step, in Fig. 9 c on the basis of the roughness of the starting sand, the rheological parameters yield point and plastic viscosity can be estimated. If in step 2, with mixing of the crushed with natural rounded aggregate, a modification of the starting sand is achieved, this improvement in the quality also has an effect on the roughness of the overall blend and therefore the flow properties.

The algorithm described provides an initial basis for an empirical model that can be used to obtain information on the working properties of mortars from only the results of the analysis of grain shape and grain size distribution for the formulation analysed. On this basis, a method was developed for determination of the quality and quantity of crushed sands for use in SCC mortars prior to actual mortar production.

re Messungen erforderlich) zusammen. In **Bild 7** sind hierfür repräsentative Beispiele dargestellt. In der Grafik wird deutlich, dass die Mörtel je nach Art des verwendeten Sandes unterschiedliche rheologische Parameter aufweisen. Das heißt, Mörtel aus Brechsanden erzielen weit höhere Werte der plastischen Viskosität und der Fließgrenze als Mörtel aus Natursanden.

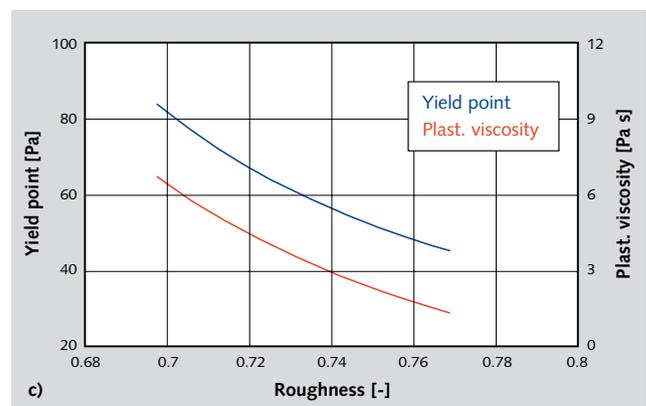
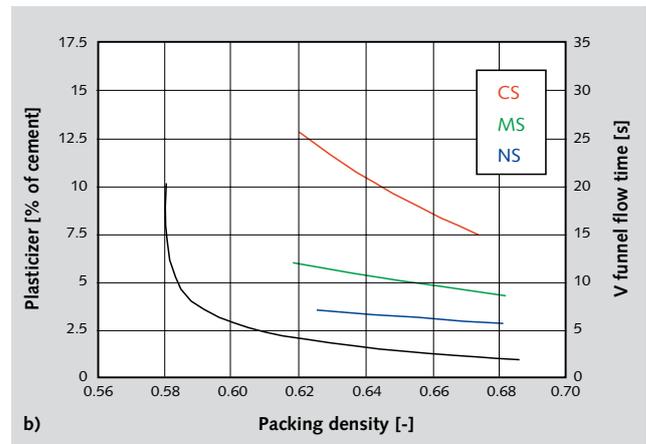
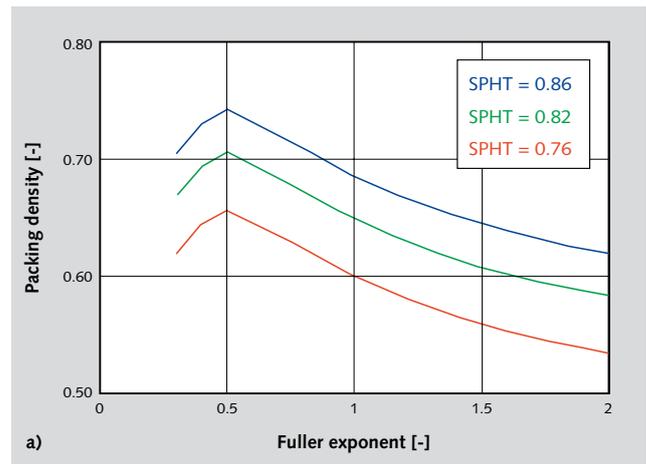
Bei der Auswertung der gemessenen granulometrischen Kenngrößen wurde deutlich, dass die Rauigkeit eine maßgebliche Einflussgröße für die rheologischen Eigenschaften ist (**Bild 8**). Die Korrelationen der rheologischen Parameter zu den weiteren granulometrischen Kenngrößen Sphärizität und Fuller-Exponent fallen deutlich geringer aus, sodass eine Zuordnung zu den Sandtypen nur durch die Rauigkeit möglich ist. Die Kenngröße Rauigkeit impliziert dabei sowohl die geometrischen Abmessungen der Körner als auch deren Sphärizität.

4 Entwicklung eines empirischen Modells

Auf Basis der gewonnenen Messergebnisse zur Kornform und zur Oberflächenbeschaffenheit sowie zur Korngrößenverteilung der Ausgangssande kann anhand **Bild 9** in drei Schritten eine Abschätzung über das Verarbeitungsverhalten der herzustellenden SVB-Mörtel getroffen werden. Benötigt werden hierfür nur die granulometrischen Parameter Fuller-Exponent n , berechnet aus der Partikelgrößenverteilung, sowie die Kornformparameter Sphärizität und Rauigkeit. Im ersten Schritt kann anhand des Fuller-Exponenten n und der Sphärizität aus **Bild 9 a** die zu erwartende Packungsdichte entnommen werden. Ist der ermittelte Wert der Packungsdichte kleiner als etwa 0,6, steigen die notwendigen Fließmittelmengen bis zum Erreichen des festgelegten Ausbreitmaßes sowie die resultierenden Trichterauslaufzeiten extrem an. Da es sich hierbei hauptsächlich um Brechsande handelt, sollten diese nur in Mischung mit Natursanden verwendet werden.

Ist der Wert der Packungsdichte größer als 0,6, erfolgt im zweiten Schritt die Ermittlung der notwendigen Fließmittelmenge aus **Bild 9 b**. Die Werte für die Trichterauslaufzeiten in **Bild 9 b** lassen bereits eine Beurteilung für die praktische Nutzung der gewählten Mischung zu. Auslaufzeiten > 11 s sind unakzeptabel. Im letzten Schritt können in **Bild 9 c** anhand der Rauigkeit des Ausgangssandes die rheologischen Parameter Fließgrenze und plastische Viskosität abgeschätzt werden. Erfolgte in Schritt Zwei durch Mischung von gebrochenen mit natürlich gerundeten Gesteinskörnungen eine Modifizierung des Ausgangssandes, wirkt sich diese Qualitätsverbesserung auch auf die Rauigkeit der Gesamtmischung und somit auf die Fließeigenschaften aus.

Der beschriebene Algorithmus stellt eine erste Grundlage für ein empirisches Modell dar, welches nur aus den Analyseergebnissen von Kornform und Korngrößenverteilung für die untersuchte Rezeptur Aussagen über die Verarbeitungseigenschaften von Mörteln erlaubt. Damit wurde eine Methode geschaffen, mit deren Hilfe der Einsatz von Brechsanden in Menge und Qualität in SVB-Mörteln vorausbestimmt werden kann.



9 a, b und c Einschätzung der Verarbeitbarkeit für eine Rezeptur mit $w/z = 0,6$
Estimation of the working properties for a formulation with $w/z = 0.6$

Literatur/Literature

- [1] Stark, U.; Müller, A.: Einfluss von Kornform und Korngröße auf die Verarbeitungseigenschaften von SVB-Mörteln. ZKG INTERNATIONAL, No. 6-2007 (Volume 60), S. 84-93, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh ISSN 0949-0205
- [2] Peronius, N.; Sweeting, T. J.: On the correlation of minimum porosity with particle size distribution. Powder Technologie 42 (1985) 113-121
- [3] Vogel, R.: „Eine Messzelle für Spezialmörtel“, Mitteilung 07/1, www.vogel-labor.de
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). DafStb, Heft 516, Beuth Verlag GmbH, 2001