

Brechsand – Abfall oder Wertstoff

Crushed Sand – Waste or Valuable Product?

Sables concassés – Déchet ou produit de valeur

Arenilla – residuo o materia de valor

Dr.-Ing. Ursula Stark, Dipl.-Ing. Steffen Liebezeit, Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Weimar*)

Zusammenfassung Von 37 Brechsanden und 32 Natursanden wurden die Korn-größenverteilungen und die Kornformen mit der fotooptischen Messmethode bestimmt. Die ermittelten SPHT-(Sphärizitäts-)Werte bestätigen, dass Natursande gut gerundet sind und ellipsoidförmige Kornformen besitzen. Die Brechsande sind dagegen kantiger und besitzen eine raue Oberfläche. Die Korngrößenverteilungen unterscheiden sich ebenfalls. Die Natursande weisen deutlich engere Verteilungen mit kleinem Fuller-Exponenten n auf als die Brechsande. Mit den experimentellen Ergebnissen konnte nachgewiesen werden, dass die Packungsdichte der Sande von beiden Größen – SPHT und n – beeinflusst wird. Für Brechsande mit größeren SPHT-Werten und kleinerem Verteilungsexponenten n werden gleiche Packungsdichten erzielt wie für Natursande mit kleinen SPHT-Werten und engen Korngrößenverteilungen mit großem n . Eine schlechtere Kornform der Partikel könnte demnach durch eine breitere Verteilung ausgeglichen werden. Diese Aussage wird mit den Untersuchungsergebnissen zur Eignung von Brechsanden als Sandkomponente im Selbstverdichtenden Beton bestätigt.

Summary The particle size distributions and particle shapes of 37 crushed sands and 32 natural sands were determined by photo-optical analysis. The data determined confirm that natural sands are well rounded and have an ellipsoidal particle shape. The crushed sands, on the other hand, are more angular and have a rough surface. The particle size distributions differ too. The natural sands have much narrower distributions with a small Fuller exponent n than the crushed sands. The empirical results could be used to prove that the packing density of the sands is influenced by both factors. For crushed sands with higher SPHT values and lower distribution exponents n , the same packing densities are achieved as for natural sands with low SPHT values and narrow particle size distributions with high n . A less favourable shape of the particles could therefore be compensated for by a wider distribution. This finding is corroborated with the study findings on the suitability of crushed sands as sand components in self-compacting concrete.

Résumé Les distributions granulométriques et formes de grains ont été déterminées pour 37 sables concassés et 32 sables naturels par la méthode de mesure photo-optique. Les valeurs SPHT (de sphéricité) déterminées ont confirmé que les sables naturels sont bien arrondis et présentent des formes de grains ellipsoïdes. Les sables concassés présentent, par contre, des arêtes vives et une surface rugueuse. Les distributions granulométriques diffèrent également. Les sables naturels présentent des distributions nettement plus serrées avec petit exposant Fuller n que les sables concassés. Les résultats expérimentaux ont permis de prouver que la densité de tassement des sables des deux grandeurs – SPHT et n – est influencée. Pour les sables concassés à valeurs SPHT plus grandes et exposant de distribution n plus petit, les densités de tassement obtenues sont les mêmes que pour les sables naturels de faibles valeurs SPHT et distributions granulométriques serrées avec grand n . Une forme de grain des particules plus défavorable pourrait donc être compensée par une répartition plus large. Cette assertion est confirmée par les résultats d'essais d'aptitude des sables concassés à l'emploi comme composant de sable du béton autocompactant.

Resumen A través del sistema de medición fotoóptico se determinaron las clasificaciones del tamaño de grano así como las formas del grano de 37 tipos de arenilla y 32 tipos de arenisca natural. Los valores SPHT (esfericidad) calculados confirmaron que las areniscas naturales están bien redondeadas y disponen de formas de grano elipsoidales. Sin embargo, las arenillas son más angulosas, disponiendo de una superficie rugosa. Las clasificaciones de los tamaños de grano también difieren entre ellas. Las areniscas naturales muestran claramente clasificaciones más rigurosas con un exponente Fuller n más reducido que las arenillas. Gracias a los resultados experimentales pudo demostrarse que la densidad de relleno de las arenas es influenciada por ambos valores – el SPHT y n . Para las arenillas con mayores valores SPHT y un menor exponente de distribución n se alcanzan las mismas densidades de relleno que para las areniscas naturales con reducidos valores SPHT y distribuciones de tamaño de grano más ajustadas con un n elevado. Por consiguiente, una forma de grano más deficiente de las partículas podría ser compensada con una clasificación más amplia. Esta declaración es confirmada por los resultados del estudio sobre la adecuación de arenillas como componente de arena en el hormigón autocompactante.

1. Einführung

Bei der Herstellung von Splitt und Schotter entsteht durch die Zerkleinerung etwa 20 % Brechsand, der gegenwärtig entweder auf Halde bzw. zur Deponierung gefahren oder für untergeordnete Bodenverfüllungen, Kabelsande oder Frostschuttschichten genutzt wird. Eine qualitativ hochwertige Verwendung als Bestandteil von Straßenasphaltnmischungen ist eher selten. Eben-

1. Introduction

In the production of ballast and chippings, around 20 % crushed sand is during the comminution process. This is currently driven to waste heaps or landfills or used for backfilling, cable sands or frost protection layers. A higher grade application as a component in asphalt blends for road construction is rarer. In the extraction of sand and gravel, varying excesses of sand are available from

*) Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, Bauhaus Universität Weimar (D) (www.uni-weimar.de/Bauing/aufber)

*) Faculty of Civil Engineering, Department of Processing and Recycling of Building Materials, Bauhaus University of Weimar (D) (www.uni-weimar.de/Bauing/aufber)

so besteht bei der Förderung von Kies und Sand regional in unterschiedlichen Größenordnungen ein Überangebot an Sanden. Deshalb ist die Frage nach einer Verwertung der Sandfraktionen nach wie vor aktuell.

Die Entwicklung des Selbstverdichtenden Betons (SVB) eröffnet hier neue Perspektiven. Die spezifischen Eigenschaften dieses Betons sind die leichte Verarbeitbarkeit, die selbsttätige Nivellierung sowie das Ausfüllen aller Bewehrungszwischenräume und der Schalung ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie bis hin zur Selbstentlüftung des Bauteils [1, 2]. Diese Eigenschaften erreicht man durch einen im Unterschied zum Normalbeton erhöhten Anteil an Sanden und Mehlen, verbunden mit einem Einsatz hochwirksamer Fließmittel. Die Optimierung der Mischungsrezeptur erfolgt über die rheologischen Eigenschaften des Zementleims und Mörtels. Das Fließverhalten wird so eingestellt, dass die Grobzuschläge von der Mörtelsuspension „getragen“ werden und nicht sedimentieren. Der Einfluss der Sieblinie der groben Gesteinskörnung tritt damit in den Hintergrund. Im Gegensatz dazu gewinnt der Einfluss der Korngröße und der Kornform der Gesteinskomponenten im Mörtel größere Bedeutung. Über die Anforderungen an die Kornform der im SVB eingesetzten Sandfraktion existiert in der Literatur lediglich die Aussage, dass im Interesse eines guten Fließverhaltens die Kornform gerundet sein soll. Nähere quantitative Angaben fehlen, was auch mit den bisherigen Beurteilungsmethoden für die Kornform von Fraktionen < 2 mm zusammenhängen dürfte. Die bisher übliche Bildauswertung von Mikroskopaufnahmen erlaubt nur die Untersuchung von kleinen Teilmengen und ergibt nur eine qualitative Einschätzung des Kornhabitus.

In den letzten Jahren haben sich auch auf dem Gebiet der Korngrößen- und Kornformbestimmung neue Messtechniken entwickelt und in der Praxis durchgesetzt. Sie erlauben eine quantitative Beschreibung der Korngrößenverteilung und besonders der Kornform von Schüttgütern. Im Unterschied zu den bisher üblichen genormten Methoden zur Kornformbestimmung mit manueller Analyse nach DIN EN 933-3 und 4 können jetzt nicht nur ausgewählte Kornfraktionen im groben Kornbereich, sondern das gesamte Schüttgut bis zu minimalen Korngrößen von etwa 0,1 mm analysiert werden. Für die Verwendung der Sandfraktionen – ob Natursand und/oder Brechsand – erschließen sich damit neue Möglichkeiten zur eindeutigen Beurteilung der Kornform und zur Formulierung von Eigenschaftsfunktionen. Letztere betreffen besonders die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen Korngröße und Kornform einerseits und andererseits den Eigenschaften der Schüttgüter bzw. der Produkte, wie beispielsweise die Packungsdichte der Schüttgüter und die resultierenden Fließeigenschaften der Mörtelsuspension im SVB.

Mit dieser Arbeit soll ein Anfang gemacht werden, die Sandfraktionen hinsichtlich ihrer Kornform und Korngröße mit den neuen fotooptischen Messmethoden quantitativ zu beschreiben, um dann Korrelationen zu Packungsdichten und zum Fließverhalten der Mörtelsuspension im SVB herzustellen. Das Ziel der Untersuchungen besteht zunächst in einer umfassenden Charakterisierung der Natursande und Brechsande, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten, und anschließend in der Suche nach geeigneten Auswahlkriterien für den Einsatz eines bestimmten Sandes für den SVB.

2. Korngröße und Kornform – Definitionen

Um eine quantitative granulometrische Charakterisierung vornehmen zu können, muss zunächst auf die grundlegenden Definitionen der Korngröße und der Kornform im Zusammenhang mit den traditionellen und den neuen Messmethoden eingegangen werden. Unter der Korngröße versteht man eine geometrische Abmessung eines beliebig geformten Teilchens. Diese Größe wird durch die Messmethode und das für die Größenermittlung genutzte Partikelmerkmal bestimmt. Für die Siebanalyse, bei der ein Größen-

region to region. For this reason the issue of utilizing the sand fractions remains a topical one.

Against this background, the development of self-compacting concrete (SCC) opens up new perspectives. The specific properties of this concrete are its good workability, self-acting levelling as well as the filling of all reinforcement gaps and formwork without the need for additional compaction energy to the self-deaeration of the construction element [1, 2]. These properties are achieved by increasing the content of sands and flour grades compared to conventional concrete combined with the addition of highly effective plasticizing agents. The optimization of the blend formulation is based on the rheological properties of the cement paste and the mortar. The flow behaviour is adjusted so that the particles of coarse aggregate are “carried” by the mortar suspension and do not sediment. The influence of the size distribution curve of the coarse rock size therefore recedes into the background. In contrast, the influence of the particle size and particle shape of the rock components in the mortar gains importance. With regard to requirements for the particle shape of the sand fraction used in the SCC, the only specification given in the relevant literature is that the particle shape should be rounded to ensure good flow behaviour. More detailed quantitative details are absent, which is probably related to the current methods for assessing the particle shape of fractions < 2 mm. Conventional image analysis of microscope images only allows the examination of small quantities of the sand fraction and only returns a qualitative estimation of the particle habit.

In recent years, new analysis methods have been developed for particle size and particle shape determination and have now become established in the field. These allow a quantitative description of the particle size distribution and in particular the particle shape of the bulk materials. In contrast to conventional standardized methods for particle shape determination with manual analysis in compliance with DIN EN 933-3 and 4, the entire bulk material can be analysed down to minimal particle sizes of around 0.1 mm rather than merely selected particle sizes in the coarse range. For the use of sand fractions – irrespective of natural and/or crushed sand – new possibilities are opened up for the definite evaluation of the particle shape and the formulation of property functions. The latter concern particularly the relationships between the parameters particle size and particle shape on the one hand and, on the other hand, the properties of the bulk materials or the products, like, for example, the packing density of the bulk materials and the resulting flow properties of the mortar suspension in the SCC.

With this research, a start is made in quantitatively describing the sand fractions in terms of their particle shape and size with the new photo-optical analysis methods, in order to establish correlations to the packing densities and the flow behaviour of the mortar suspension in the SCC. The aim of the studies is first an extensive characterization of natural and crushed sands to determine common characteristics and differences, and then to search for appropriate selection criteria for the use of a certain sand for SCC.

2. Particle Size and Particle Shape – Definitions

In order to make a quantitative granulometric characterization, it is first necessary to look at the basic definitions of the particle size and particle shape in connection with the traditional and the new measurement methods.

Particle size refers to a geometric dimension of a random-shaped particle. This size is determined with the measurement method and the particle characteristic used for the size determination. For sieve analysis, in which a comparison is made between the particle and mesh width of a sieve, the particle size corresponds to the clear mesh width of the sieve. For photo-optical measurement methods with high-resolution and faster digital photography, the silhouette of the particle is evaluated electronically and the par-

vergleich zwischen dem Teilchen und der Maschenweite eines Siebes stattfindet, entspricht die Korngröße der lichten Maschenweite dieses Siebes. Für die fotooptischen Messmethoden mit hochauflösender und schneller digitaler Fotografie wird das Schattenbild des Teilchens elektronisch ausgewertet und damit die Korngröße in der Regel als Durchmesser des flächengleichen Kreises definiert.

Für die Beurteilung der Kornform gibt es nach *Stieß* [3] eine Vielzahl von Ansätzen, um Maßzahlen für die Kornform festzulegen. Die meisten bestehenden Definitionen lassen sich dabei auf ein Verhältnis zweier Teilchenabmessungen zurückführen, die unabhängig voneinander an einem Teilchen ermittelt werden.

Im grobdispersen Größenbereich wird die Kornformbeurteilung bisher nur auf die Grunddefinition – Verhältnis von Länge zu Breite der Teilchen – und die dazugehörigen Mengenanteile zurückgeführt. Diese Beurteilung setzt voraus, dass die einzelnen Teilchen so groß sind (in der Regel > 4 mm), dass man sie einzeln vermessen kann, sie also als räumliche Körper beurteilt. Bei der Vermessung der realen Teilchen wird das Verhältnis von größter zu kleinster Abmessung bestimmt.

Für feindisperse Schüttgüter wird die Kornform als Verhältnis bestimmter Oberflächen beschrieben. Nach DIN 66141 wird der Kornformfaktor φ als Verhältnis der Oberfläche eines Teilchens zur Oberfläche der volumengleichen Kugel definiert. Für alle unregelmäßig geformten Teilchen ist $\varphi > 1$. Diese Kornformkennzahlen ergeben für ein bestimmtes Schüttgut aus messtechnischen Gründen grundsätzlich eine integrale Größe.

Unabhängig von der Aussagefähigkeit der üblichen Kornformparameter kann mit keiner der beiden Methoden – weder mit dem manuellen Ausmessen noch mit der Bestimmung der Oberfläche – die Kornform von Sanden ermittelt werden. Für die Ermittlung des L/B-Verhältnisses sind die Einzelkörner zu klein und für die Messung der spezifischen Oberfläche sind die Körner zu grob. In beiden Fällen liegt die Korngröße deutlich außerhalb des jeweiligen Messbereiches. Deshalb dominiert für die Beurteilung der Kornform von Sanden immer noch die augenscheinliche Beurteilung unter dem Mikroskop.

Mit den fotooptischen Messmethoden wird eine numerische Beschreibung der Korngrößen- und der Kornformverteilung möglich. Zur Kornformbeschreibung werden häufig die Parameter L/B und $U/2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A$ genutzt. Letzterer wird als Sphärizität (SPHT) bezeichnet und ist das Verhältnis von gemessenem Umfang der Schattenprojektion des Teilchens und zum Umfang des flächengleichen Kreises. Die Sphärizität stellt damit eine Übertragung des Kornformfaktors φ für feindisperse Schüttgüter von der Oberfläche auf die Projektionsfläche dar. Die Zahlenwerte sind analog zu φ ebenfalls ≥ 1 .

3. Probenbeschreibung und Untersuchungsmethoden

Für die eingangs beschriebene Aufgabenstellung wurden sowohl von Sandherstellern als auch von Sandverarbeitern auf Anfrage insgesamt 69 Sande für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Es handelte sich dabei um 37 Brechsande (BS) und 32 Natursande (NS) aus unterschiedlichen geologischen Formationen und hergestellt mit verschiedenen Aufbereitungsverfahren. Da von einigen Proben nur unzureichende Mengen vorhanden waren, konnte nicht mit allen Proben das vollständige Versuchsprogramm durchgeführt werden.

Zur Charakterisierung der Sande und deren Eigenschaften wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

Siebanalyse nach DIN EN 933-2

Die Bestimmung des Mehlkornanteils und der abschlämmbaren Bestandteile erfolgte abweichend von der Norm als Trockensiebung.

- Fotooptische Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Kornform des Kornanteils > 100 μm mit einem CPA-Gerät (CPA-Analyse)

particle size generally defined as the diameter of the area-equivalent circle.

For the evaluation of the particle shape, according to *Stieß* [3], a large number of approaches are available to define quantities for the particle shape. Most existing definitions are based on a ratio of two particle dimensions, which are determined independently of each other on one particle.

In the coarsely dispersed size range, particle shape evaluation is so far only based on the basic definition – ratio of the length (L) to the breadth (B) of the particles – and the associated constituent amounts. Precondition for this evaluation is that the individual particles are so large (generally > 4 mm) that they can be measured individually, i.e. evaluated as spatial bodies. In the measurement of real particles, the ratio of the largest to the smallest dimension is determined.

For finely dispersed bulk materials, the particle shape is described as the ratio of certain surface areas. According to DIN 66141, the particle shape factor φ is defined as the ratio of the surface area of a particle to the surface area of sphere of equivalent volume. For all irregularly shaped particles, $\varphi > 1$. For a certain bulk material, these particle shape factors always result in an integral quantity for reasons related to the measurement equipment and procedure.

Irrespective of the information value of the conventional particle shape parameters, neither of the two methods – manual measurement nor determination of the surface area – can be applied to determine the particle shape of sand. For the determination of the L/B ratio, the individual grains are too small, and for measurement of the specific surface area, the grains are too coarse. In both cases, the particle size lies well outside the respective measurement range. For this reason, for evaluation of the particle shape of sands, visual assessment through a microscope remains the dominant method.

With photo-optical measurement methods, a numeric description of the particle size and particle shape distribution is possible. For the particle shape description, the parameters L/B and $U/2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A$ are frequently used. The latter is termed sphericity (SPHT) and is the ratio of the measured perimeter of the projected silhouette of the particle and circumference of the area-equivalent circle. The sphericity therefore represents a transfer of the particle shape factor φ for finely dispersed bulk materials from the surface area to the projected area. In analogy to φ , the numerical values are also ≥ 1 .

3. Sample Description and Analysis Methods

To achieve the objectives described in the introduction, sand producers and sand processors made a total of 69 sands available for the tests. These comprised 37 crushed sands (CS) and 32 natural sands (NS) from different geological formations and produced by means of various processing methods. As only insufficient quantities of some samples were available, the full programme of tests could not be conducted with all samples.

For characterization of the sands and their properties, the following tests were performed:

Sieve analysis in compliance with DIN EN 933-2

The content of flour-sized particles and the slimes were determined by dry sieving in a process deviating from the standard.

- Photo-optical determination of the particle size distribution and the particle shape of the fraction > 100 μm with a CPA device (CPA analysis).

For the sands tested in this study, the analyses were performed with the analyzer Haver R CPA 4-2MB in real time in the measurement range 1 and with the particle shape mode. The sample is conveyed on a computer-controlled vibrating feeder into the fall level, from where the particles pass through measurement level of the CCD line camera in freefall. In counterlight (halogen light strip), they are scanned line by line and the

Für die hier untersuchten Sande wurden die Analysen mit dem Messgerät Haver R CPA 4-2MB Real Time im Messbereich 1 und mit dem Kornformmodus durchgeführt. Die Probe wird über eine computergesteuerte Vibrationsrinne in die Fallebene gefördert, von wo sich die Teilchen im freien Fall durch die Messebene der CCD-Zeilenkamera bewegen. Im Gegenlicht (halogenspeiste Leuchtzeile) werden sie zeilenweise abgescannt und die Messdaten in 255 internen Größenklassen ausgewertet. Der Messgutdurchsatz wird automatisch vom System gesteuert. Im Kornformmodus erfolgen eine kontinuierliche Erfassung von Anzahl und Länge der Sehnen und eine zusätzliche Registrierung der Sehnenadressen. Aus der Rekonstruktion der Bilder unter Berücksichtigung der Fallgeschwindigkeit der Teilchen und deren Auswertung nach geometrischen Merkmalen kann sowohl die Korngrößen- als auch die Kornformverteilung ermittelt werden. Als Menge wird die Anzahl der Teilchen in den Kornklassen bestimmt und über den Äquivalentdurchmesser die Volumenverteilung berechnet [4].

Ermittlung der Rohdichte der Sande mit einem Heliumpycnometer

Für die Messung der Rohdichte wurde der Sand in seiner originalen Korngröße verwendet. Damit werden eingeschlossene Poren mit erfasst. Die Rohdichte berechnet sich dann aus dem Quotienten der Masse und dem gemessenen Volumen der Sandkörner.

Bestimmung der Schüttdichte in Anlehnung an die DIN EN 1097-3

Die Schüttdichte beschreibt den Quotienten aus der Masse einer unverdichteten, trockenen Gesteinskörnung, welche ein definiertes Messgefäßvolumen ausfüllt. Als Gefäß wurde ein Metallbehälter mit einem Volumen von 1 l verwendet, um Randeinflüsse auf das Ergebnis zu minimieren.

Bestimmung der Rütteldichte

Da für die Ermittlung der Rütteldichte kein nach DIN genormtes Verfahren besteht, wurde auf das für die Schüttdichtebestimmung bereits benutzte Messgefäß mit dem Fassungsvermögen von 1 l zurückgegriffen, jedoch mit einem Aufsatzring und damit einem Einfüllvolumen von 1,5 l. Nach dem Verdichtungsvorgang wird der Aufsatzring abgezogen und die verdichtete Masse des Messvolumens von 1 l ausgewogen. Der Verdichtungsvorgang fand auf einem üblichen Betonrütteltisch mit integrierten Magnethaltungen statt. Die Verdichtungsdauer wurde in Vorversuchen mit 1 min ermittelt. Das heißt, nach dieser Zeit konnte keine messbare Veränderung des verdichteten Messvolumens von 1 l festgestellt werden.

Herstellung von Mörtelmischungen mit gleichem Ausbreitmaß

Der Mehlkorntyp eines SVB (ohne Stabilisierer) nach *Okamura* mit einer standardisierten Rezeptur bildete die Ausgangsbasis für die Mischungszusammensetzung. Die Mörtel bestanden aus jeweils einer konstanten Menge Zement, einem konstanten Mehlkornanteil, der sich zusammensetzte aus Steinkohlenflugasche und dem Mehlkornanteil des Sandes, und einer konstanten Sandmenge der Körnung > 0,125 mm. Als w/z-Wert wurde 0,6 festgelegt. Das Ziel der Mörteluntersuchungen war die Bestimmung der prozentualen, zementbezogenen Masse des benötigten Fließmittels, um ein Ausbreitmaß von 240 mm mit dem Hägermann-Trichter zu erreichen.

4. Messergebnisse

4.1 Korngrößen und Korngrößenverteilungen

Die Auswertung der Siebanalyse zeigte, dass nicht alle Sande wie erwartet Korngrößen < 2 mm besitzen. Im Ergebnis sind 7 Natursande der Lieferkörnung 0/1 und 24 der Lieferkörnung 0/2 zuzuordnen. Bei den Brechsanden können 26 Sande der Lieferkörnung 0/2 und 5 Sande der Lieferkörnung 0/4 zugeordnet werden.

measurement data evaluated in 255 internal size classes. The throughput of the sample material is controlled automatically by the system. In the particle shape mode, the number and length of the chords are recorded continuously and the chord addresses are also registered. From the reconstruction of the images, with allowance for the fall velocity of the particles and their evaluation based on geometric characteristics, both the particle size and the particle shape distribution can be determined. The number of particles in the size classes is determined as the quantity and the volume distribution is calculated based on the equivalent diameter [4].

Determination of the bulk density of the sands with a helium pycnometer

For the measurement of the bulk density, the sand is used in its original particle size. Voids are also included in the analysis. The bulk density is then calculated from the quotient of the mass and the measured volume of the sand grains.

Determination of the loose bulk density based on DIN EN 1097-3.

The bulk density describes the quotient from the mass of a non-compacted dry rock size which fills a defined measurement vessel volume. The vessel used was a metal container with a volume of 1 l, to minimize marginal influences on the result.

Determination of the vibration density

As no procedure is defined in a DIN standard for determination of the vibration density, the 1-l measurement vessel already used for determination of the loose bulk density was used, but with an extension ring and consequently a filling volume of 1.5 l. Following the compaction process, the extension ring was removed and the compacted mass of the measured volume of 1 l was weighed. Compaction was performed on a standard concrete vibrating table with integrated magnetic holders. The compaction time was determined as 1 min in preliminary tests. That means that after this time, no measurable change in the compacted measured volume of 1 l could be established.

Production of mortar blends with the same slump

The flour particle type of a SCC (without stabilizer) after *Okamura* with a standardized formula formed the basis for the blend composition. The mortars each consisted of a constant quantity of cement, a constant quantity of flour particles, consisting of coal fly ash and the flour particles of the sand, and a constant quantity of sand > 0.125 mm. 0.6 was defined as the w/c value. The aim of the mortar tests was the determination of the percentual, cement-based mass of the necessary plasticizer, to obtain a slump flow of 240 mm with the Hägermann funnel.

4. Measurement Results

4.1 Particle size and particle size distributions

The evaluation of the sieve analysis showed that not all sands had particle sizes < 2 mm as expected. Seven natural sands can be classed as delivered grade 0/1 and 24 can be classed as delivered grade 0/2. Of the crushed sands, 26 sands could be classed as delivered grade 0/2 and five sands as the delivered grade 0/4. An initial comparison of the mean particle sizes (weighted arithmetic mean) shows that there is no difference in the statistical mean between the natural and crushed sands of the same delivered grade. In contrast, the content of flour particles and the quantities of slimes are, as expected, much higher in the crushed sands (Table 1).

For exact characterization therefore, it is necessary to refer to the complete particle size distributions, which, owing to the relatively large number of particle size classes, can be better described with the results of the CPA analysis. The software "Pmp-Compact" from Grainsoft was used to calculate the entire particle size distribution of the sands from the results of the CPA analysis and the sieve analysis. The curves of particle size distributions – in particular the distribution density functions – show clear differences between the

Lieferkörnung	NS 0/1	NS 0/2	BS 0/2	BS 0/4
Probenanzahl [Stk.]	7	24	26	5
mittlere Korngröße nach Siebung (x_{m3}) [μm]				
MW	451	929	937	1448
σ_1	124	142	147	201
Bereich von:	335	705	651	1246
bis	713	1166	1171	1801
Mehlkorn [$< 0,125 \text{ mm}$] [M.-%]				
MW	10,3	1,7	13,8	9,6
σ_1	6,4	1,3	5,1	2,5
Bereich von:	0,1	0,3	3,0	4,8
bis	19,4	6,7	24,0	11,7
abschlämbare Bestandteile [$< 0,063 \text{ mm}$] [M.-%]				
MW	2,1	0,3	7,7	4,7
σ_1	1,8	0,2	3,7	2,7
Bereich von:	0,0	0,1	0,9	1,2
bis	5,2	1,0	14,8	7,8
Verteilungsexponent n der Fuller-Verteilung				
MW		1,05	0,70	
σ_1		0,23	0,14	
Bereich von:		0,85	0,54	
bis		1,51	1,08	

MW = Mittelwert

Tabelle 1: Vergleich der Korngemische von Natur- und Brechsanden

Werden zunächst die mittleren Korngrößen (gewogenes arithmetisches Mittel) betrachtet, so besteht zwischen Natur- und Brechsanden gleicher Lieferkörnungen im statistischen Mittel kein Unterschied. Die Mehlkornanteile und die Mengen der abschlämbaren Bestandteile sind dagegen erwartungsgemäß bei den Brechsanden deutlich größer (Tabelle 1) als bei den Natursanden.

Zur exakteren Charakterisierung müssen demzufolge die kompletten Korngrößenverteilungen herangezogen werden, die sich mit den Ergebnissen der CPA-Analyse aufgrund der größeren Kornklassenanzahl besser beschreiben lassen. Aus den Ergebnissen der CPA-Analyse und der Siebanalyse wurde mit dem Programm „Pmp-Compact“ von Grainsoft die Gesamtkorngrößenverteilung der Sande berechnet.

Die Korngrößenverteilungen – besonders die Verteilungsdichtefunktionen – zeigen deutliche Unterschiede im Kurvenverlauf zwischen Natur- und Brechsanden. Diese charakteristischen Unterschiede sind am Beispiel von NS 05 und BS 12 in Bild 1 links dargestellt. Das Maximum der Verteilungsdichtefunktionen der meisten Natursande liegt im feinen Bereich der Verteilung, bei den

Supplied grade	NS 0/1	NS 0/2	CS 0/2	CS 0/4
Number of samples	7	24	26	5
Mean particle size after screening (x_{m3}) [μm]				
MV	451	929	937	1448
σ_1	124	142	147	201
Range from:	335	705	651	1246
to	713	1166	1171	1801
Flour particles [$< 0,125 \text{ mm}$] [mass %]				
MV.	10.3	1.7	13.8	9.6
σ_1	6.4	1.3	5.1	2.5
Range from:	0.1	0.3	3.0	4.8
to	19.4	6.7	24.0	11.7
Slimes [$< 0.063 \text{ mm}$] [mass %]				
σ_1	2.1	0.3	7.7	4.7
σ_1	1.8	0.2	3.7	2.7
Range from:	0.0	0.1	0.9	1.2
to	5.2	1.0	14.8	7.8
Distribution exponent of the Fuller distribution				
MV		1.05	0.70	
σ_1		0.23	0.14	
Range from:		0.85	0.54	
to		1.51	1.08	

MV = Mean value

Table 1: Comparison of the particle size compositions of natural and crushed sands

natural and crushed sands. These characteristic differences are shown based on the example of NS 05 and CS 12 in the left of Fig. 1. The maximum of the distribution density functions of most natural sands lies in the fine range of the distribution, for the crushed sands on the other hand in the coarse size range. There are, however, natural and crushed sands with relatively similar distribution density functions, as clearly shown in the right of Fig. 1 based on the example of NS 24 and CS 21.

For describing particle size distributions, various distribution functions are proposed in the literature. For crushed bulk materials, a good fit can be obtained with the Fuller distribution:

$$Q_3(X) = \left(\frac{X}{X_{\text{max}}} \right)^n$$

The natural sands can be well described with the Fuller distribution. The exponent n provides information on the width of the distribution and has a crucial influence on the packing densities of bulk materials [5, 6].

The evaluation of the distributions after Fuller results in an exponent of $n = 1.05$ as a statistical mean for the natural sands and a

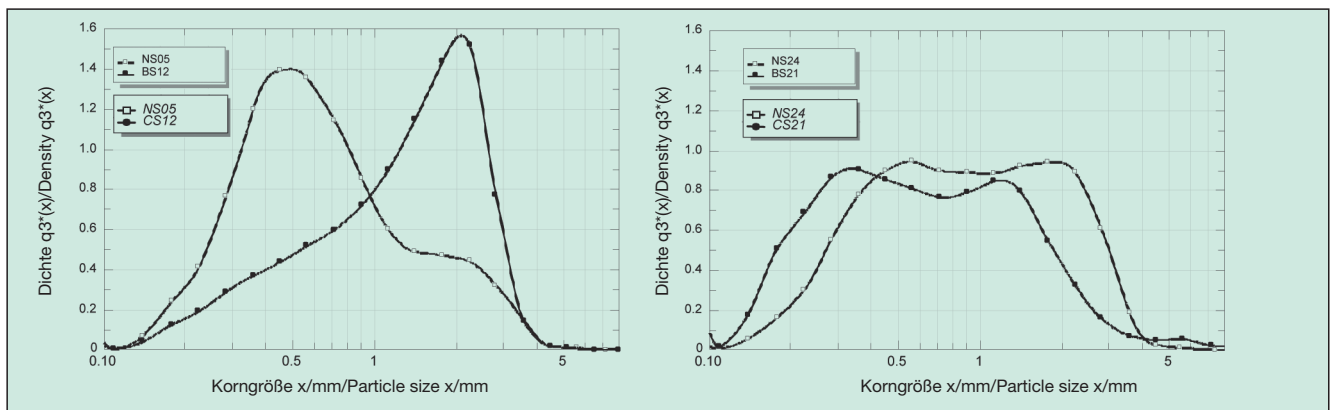


Bild 1: Verteilungsdichtefunktionen von NS 05 und BS 12, links, und von NS 24 und BS 21, rechts
Fig. 1: Distribution density functions of NS05 and CS 12, left, and of NS 24 and CS 21, right

Probenanzahl [Stk.]	NS gesamt	BS gesamt
	32	37
	SPHT [-]	
MW	1,089	1,167
σ_1	0,010	0,030
Bereich von:	1,067	1,109
bis	1,110	1,217
	L/B [-]	
MW	1,431	1,621
σ_1	0,028	0,073
Bereich von:	1,368	1,456
bis	1,520	1,784

Tabelle 2: Gemittelte Kornformparameter SPHT und L/B für Natur- und Brechsande

Brechsanden hingegen im groben Bereich. Es existieren aber auch Natur- und Brechsande mit relativ ähnlichen Verteilungsdichtefunktionen, wie in Bild 1 rechts am Beispiel von NS 24 und BS 21 deutlich gezeigt werden kann. Zur Beschreibung von Korngrößenverteilungen werden in der Literatur verschiedene Verteilungsfunktionen vorgeschlagen. Für gebrochene Schüttgüter ist mit der Fullerverteilung

$$Q_3(X) = \left(\frac{X}{X_{\max}} \right)^n$$

eine gute Anpassung zu erzielen. Auch die Natursande lassen sich mit der Fullerverteilung gut beschreiben. Der Exponent n gibt Auskunft über die Breite der Verteilung und beeinflusst entscheidend die Packungsdichten von Schüttgütern [5, 6].

Die Auswertung der Verteilungen nach Fuller ergibt im statistischen Mittel für die Natursande einen Exponenten von $n = 1,05$ und für die Brechsande einen Wert von $n = 0,70$. Große Exponenten bedeuten enge Korngrößenverteilungen und niedrige Exponenten wie bei den Brechsanden breite Verteilungen.

4.2 Kornform

Die Kornform wird mit den Parametern SPHT und L/B beschrieben, die analog zur mittleren Korngröße als gewogenes arithmetisches Mittel für einen Sand berechnet wurden. Die statistische Auswertung aller Messergebnisse in Tabelle 2 zeigt, dass Natursande erwartungsgemäß eine niedrigere Sphärität und ein niedrigeres L/B-Verhältnis aufweisen. Sie besitzen also eine bessere, stärker gerundete Kornform als die Brechsande. Die Zahlen zeigen aber auch, dass es zwischen den Natur- und Brechsanden Über-

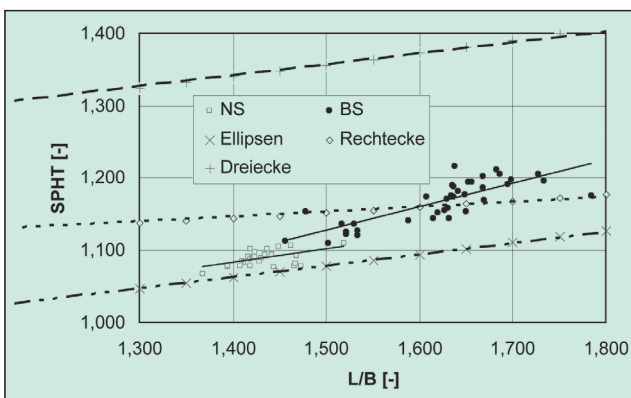


Bild 2: SPHT- und L/B-Werte für Brech- und Natursande und ausgewählte Kornformen

Number of samples [units]	NS total	CS total
	32	37
	SPHT [-]	
MW	1.089	1.167
σ_1	0.010	0.030
Range from:	1.067	1.109
to	1.110	1.217
	L/B [-]	
MW	1.431	1.621
σ_1	0.028	0.073
Range from:	1.368	1.456
to	1.520	1.784

Tabelle 2: Mean particle shape parameters SPHT and L/B for natural and crushed sands

value of $n = 0.70$ for the crushed sands. Large exponents mean narrow particle size distributions and low exponents, as in the case of the crushed sands, wide distributions.

4.2 Particle shape

The particle shape is described with the parameters SPHT and L/B, which, like the mean particle size, were calculated as a weighted arithmetic mean for a sand. The statistical evaluation of all measurement results in Table 2 shows that, as expected, the natural sands have a lower sphericity and a lower L/B ratio. They therefore have a better, more rounded particle shape than the crushed sands. The figures show too, however, that there are overlaps between the natural and crushed sands in which the two sand types are similar in their particle shapes.

In Fig. 2, the relationship between SPHT and L/B for the natural and crushed sands as well as for selected particle shapes (ellipse, rectangle and triangle with the same areas) is shown graphically. A comparison of the shape of the trend lines of the natural and crushed sands with the plotted limit curves for these shapes shows that the natural sands approach the ellipses and the crushed sands the rectangles. Extreme particle shapes like that of the triangles are not found. It can also be seen that the rise in the trend curve of the natural sands is almost parallel to the limit curve of the ellipses. That means that sphericity only changes as a result of changes in the geometric dimensions L/B. The natural sands therefore have a smooth surface. In contrast, the trend line of the crushed sands shows a higher rise than the limit curves. This difference in the rise in the trend lines can be attributed to the rough surface of the crushed sands. This means that the characteristic

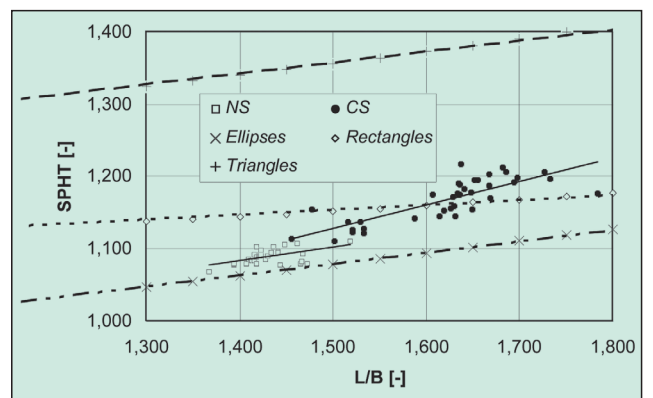


Fig. 2: SPHT and L/B values for crushed and natural sands and selected particle shapes

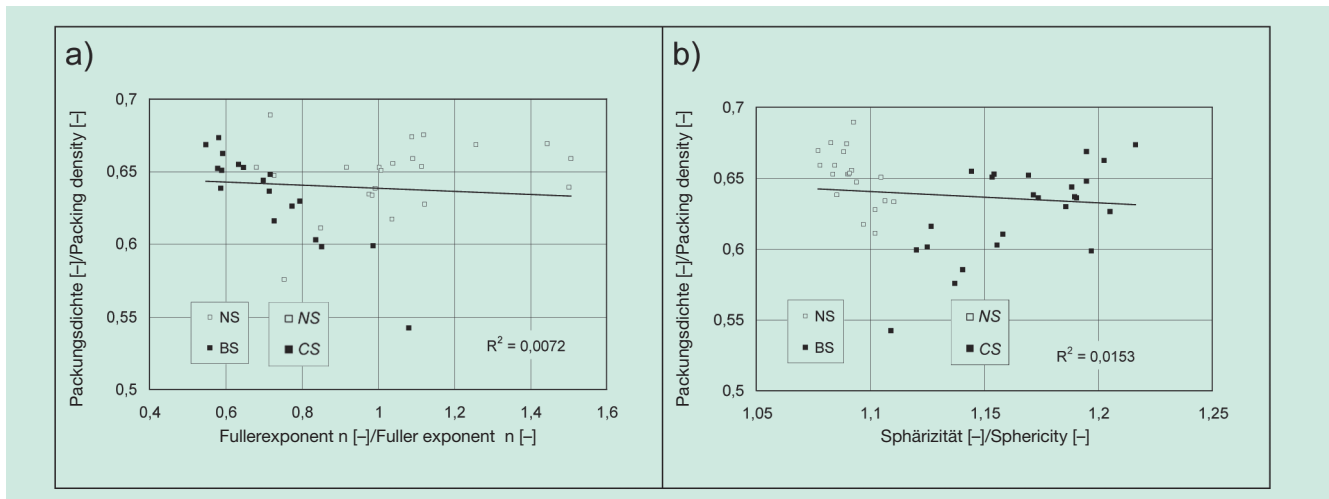


Bild 3 : Abhängigkeit der Packungsdichte vom Exponenten n der Korngrößenverteilung (a) und von der Sphärizität (b)
 Fig. 3: Dependence of the packing density on the exponent n of the particle size distribution (a) and the sphericity (b)

lappungsbereiche gibt, in denen sich beide Sandtypen in ihren Kornformen ähneln.

In Bild 2 ist der Zusammenhang zwischen SPHT und L/B für die Natur- und Brechsande sowie für ausgewählte Kornformen (Ellipse, Rechteck und Dreieck mit jeweils gleichen Flächeninhalten) grafisch dargestellt. Vergleicht man den Trendlinienverlauf der Natur- und Brechsande mit den eingetragenen Grenzkurven für diese Formen, so nähern sich die Natursande eher den Ellipsen und die Brechsande den Rechtecken an. Extreme Kornformen wie die der Dreiecke treten nicht auf. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Anstieg der Trendkurve der Natursande fast parallel zur Grenzkurve der Ellipsen verläuft. Das heißt, die Sphärizität ändert sich nur infolge von Veränderungen der geometrischen Abmessungen L/B. Die Natursande besitzen also eine glatte Oberfläche. Die Trendlinie der Brechsande besitzt dagegen einen größeren Anstieg als die Grenzkurven. Diese Unterschiede im Anstieg der Trendlinien sind einer rauen Oberflächenbeschaffenheit der Brechsande zuzuordnen. Das bedeutet, dass die Kennzahl SPHT sowohl Aussagen zur Partikelgeometrie als auch zur Oberflächenbeschaffenheit macht, während L/B nur die Partikelgeometrie berücksichtigt. In den nachfolgenden Betrachtungen zu den Eigenschaftsfunktionen wird deshalb die Kennzahl SPHT zur Charakterisierung der Kornform genutzt.

4.3 Eigenschaftsfunktionen

Die Packungsdichte als Größe zur Beschreibung der Raumauffüllung durch ein Schüttgut wird berechnet aus dem Quotienten von Rüttel- oder Schütt- und Rohdichte des Schüttgutes. Die Summe aus Packungsdichte und Hohlraumgehalt bildet somit das Gesamtvolumen. Die Packungsdichte stellt deshalb eine zentrale Größe zur Eigenschaftscharakterisierung von Schüttgütern dar. Im Weiteren wird bei ihrer Angabe die mit der Rütteldichte berechnete Größe verstanden. Nach den bisherigen Berechnungen und Erfahrungen hängt sie von der Breite der Verteilung – ausgedrückt durch den Fullerexponenten n – und der Kornform ab.

Die Auswertung der Messergebnisse spiegelt in der Darstellung der Packungsdichte sowohl in der Abhängigkeit von der Kornformkennzahl SPHT als auch vom Fullerexponenten n in den Bildern 3 a und b für die untersuchten Sande diese Zusammenhänge zunächst nicht wider. Die Ursache dafür ist darin zu sehen, dass sich die Einflüsse der Kornform und der Korngrößenverteilung auf die Packungsdichte überlagern. Die Zusammenhänge können nur gefunden werden, wenn jeweils eine Einflussgröße konstant gehalten wird.

SPHT provides information both on the particle geometry and the surface condition, while L/B only refers to the particle geometry. In the following observations regarding the property functions, the characteristic SPHT is therefore used to characterize the particle shape.

4.3 Property functions

The packing density as a quantity to describe the filling of a space by a bulk material is calculated from the quotient of the vibration density, loose bulk density or bulk density of the bulk material. The sum of the packing density and the content of voids therefore forms the total volume. The packing density therefore represents a key quantity for characterizing the properties of bulk materials. In the following, the specification of the packing density refers to the quantity calculated with the vibration density. According to calculations and experience, it depends on the width of the distribution – expressed with the Fuller exponent n – and the particle shape.

At first, the evaluation of the measured data does not reflect these relationships in the representation of the packing density either in the dependence on the particle shape factor SPHT or on the Fuller exponent n in Figs. 3a and b for the sands studied. This can be explained by the fact that the influences of the particle shape and the particle size distribution overlie the packing density. The relationships can only be found if one influencing factor is kept constant in each case.

The results of such an evaluation of the available data are shown in the following graphics. Fig. 4 shows the dependence of the packing density on the Fuller exponent n with SPHT as the parameter. In Fig. 5, on the other hand, the relationship of the packing density with the sphericity is shown at constant n as the parameter.

With certainty factors R^2 for the dependence on the Fuller exponent n in Fig. 4 with a value of around 0.7 and for the dependence on the sphericity in Fig. 5 with a value of around 0.6, these relationships can be regarded as significant. From the dependences, it can be derived that at constant particle shape the packing density of the sands increases with falling distribution exponent, irrespective of whether natural or crushed sands are considered. On the other hand, the packing density increases for sands with constant n with decreasing sphericity values, e. g. with better particle shape.

Furthermore, it can be seen that a high packing density or a low void content of the bulk materials can be achieved in natural sands

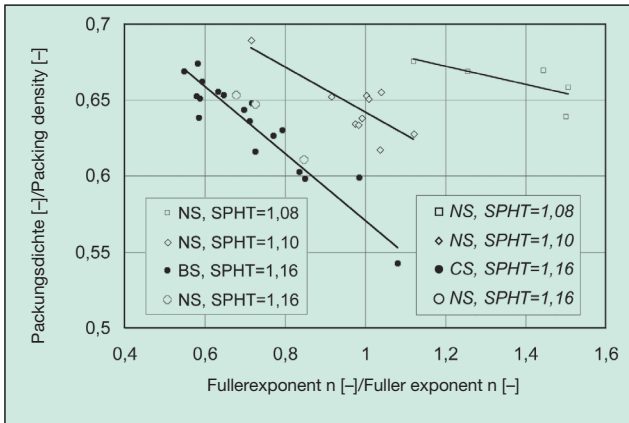


Bild 4: Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Fullerexponent n für Natur- und Brechsande mit SPHT als Parameter ($R^2 \sim 0,7$)

Fig. 4: Relationship between packing density and Fuller exponent n for natural and crushed sands with SPHT as parameter ($R^2 \sim 0.7$)

Das Ergebnis einer solchen Auswertung der vorliegenden Daten zeigen die folgenden Grafiken. Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der Packungsdichte vom Fullerexponenten n mit SPHT als Parameter. In Bild 5 hingegen wird der Zusammenhang der Packungsdichte mit der Sphärität bei konstantem n als Parameter dargestellt. Mit Bestimmtheitsmaßen R^2 für die Abhängigkeit vom Fullerexponenten n in Bild 4 mit einem Wert von etwa 0,7 und für die Abhängigkeit von der Sphärität in Bild 5 mit einem Wert von etwa 0,6 können diese Zusammenhänge als gesichert gelten. Aus den Abhängigkeiten lässt sich ableiten, dass bei konstanter Kornform die Packungsdichte der Sande mit sinkendem Verteilungsexponenten steigt, unabhängig davon, ob es sich um Natur- oder Brechsande handelt. Andererseits steigt die Packungsdichte bei Sanden mit konstantem n mit sinkenden Sphäritätswerten, d. h. mit besserer Kornform.

Weiterhin ist zu erkennen, dass eine hohe Packungsdichte bzw. ein geringer Hohlraumgehalt der Schüttungen bei Natursanden mit engen Korngrößenverteilungen, d. h. mit hohen Werten des Verteilungsexponenten n , und einer gut gerundeten Kornform mit niedrigen SPHT-Werten erreicht werden kann. Mit Brechsanden

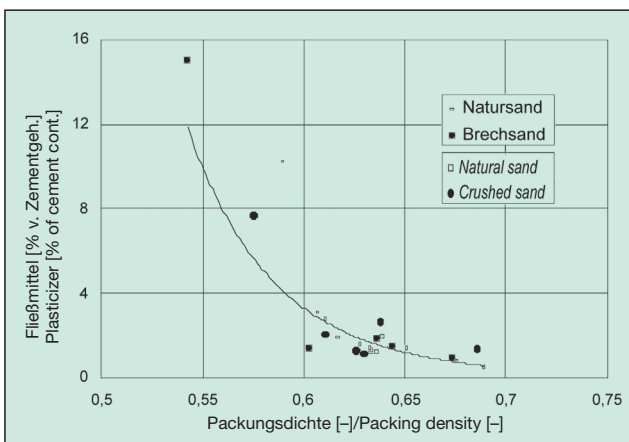


Bild 6: Fließmittelbedarf eines Mörtels für SVB in Abhängigkeit von der Packungsdichte ($R^2 = 0,7$)

Fig. 6: Plasticizer requirement of a mortar for SCC as a function of the packing density ($R^2 = 0.7$)

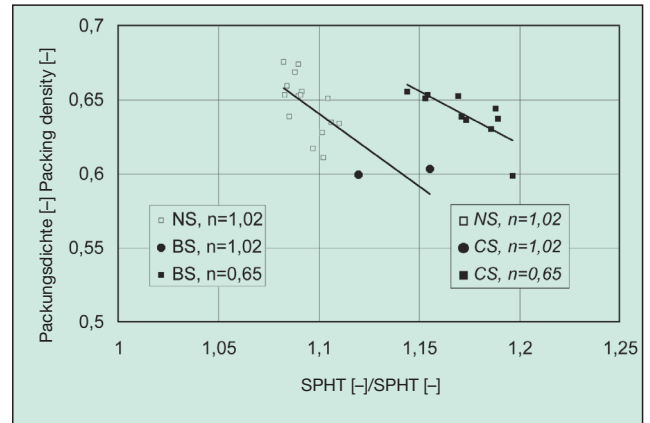


Bild 5: Zusammenhang zwischen Packungsdichte und SPHT mit dem Fullerexponenten als Parameter ($R^2 \sim 0,6$)

Fig. 5: Relationship between packing density and SPHT with the Fuller exponent as parameter ($R^2 \sim 0.6$)

with narrow particle size densities, i. e. with high values of the distribution exponents n and a well-rounded particle shape with lower SPHT values. For crushed sands, equally high packing densities can be achieved despite high values of the Fuller exponent n ; these lie in the region of the optimal values, specified in the literature as $n = 0.5$. For example, the natural sand NS 10 with a SPHT of 1.083 and an n of 1.120 reaches a packing density of 0.675. The same packing density can, however, be obtained with the crushed sand CS 09 with a SPHT of 1.217 and an n of 0.582. Accordingly, a wider particle size distribution can compensate for the less favourable particle shape of the crushed sands.

To obtain a first indication of the suitability of a sand for use in self-compacting concrete, tests were conducted on 14 selected natural sands and 14 crushed sands that characterize the entire particle size and particle shape ranges, to determine the required plasticizer for mortar blends with a constant slump. The results shown in Fig. 6 show that with higher packing density, the quantity of plasticizer needed to achieve a constant slump decreases. This relationship can be regarded as significant with a certainty factor of $R^2 = 0.7$.

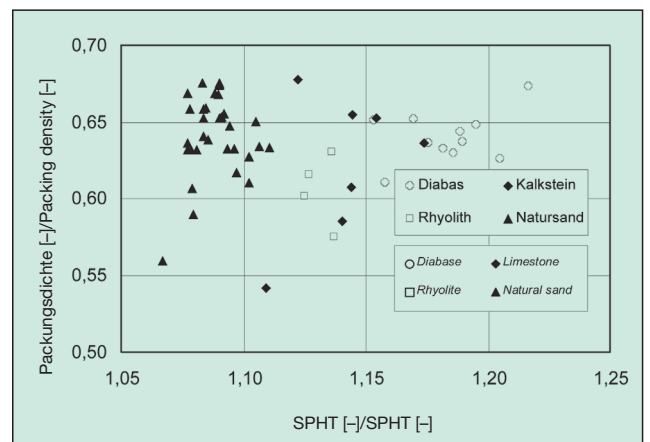


Bild 7: Packungsdichte und Kornform im Zusammenhang mit der Gesteinsart

Fig. 7: Packing density and particle shape relative to the type of rock

lassen sich gleich hohe Packungsdichten trotz hoher Werte bei Fullerexponenten n erzielen, die in der Nähe des optimalen Wertes liegen, der in der Literatur mit $n = 0,5$ angegeben wird. Beispielsweise erreicht der Natursand NS 10 mit einer SPHT von 1,083 und einem n von 1,120 eine Packungsdichte von 0,675. Die gleiche Packungsdichte ist aber auch mit dem Brechsand BS 09 mit einer SPHT von 1,217 und einem n von 0,582 zu erzielen. Die schlechtere Kornform der Brechsande kann demnach durch breitere Korngrößenverteilungen kompensiert werden.

Um erste Aussagen über die Eignung eines Sandes für die Verwendung im Selbstverdichtenden Beton treffen zu können, wurden an 14 ausgewählten Natursanden und 14 Brechsanden, die den gesamten Bereich von Korngröße und Kornform charakterisieren, Untersuchungen zur Ermittlung des Fließmittelbedarfs von Mörtelmischungen bei konstantem Ausbreitfließmaß durchgeführt. Die Ergebnisse in **Bild 6** zeigen, dass mit größerer Packungsdichte der Fließmittelbedarf zur Erreichung eines konstanten Ausbreitfließmaßes abnimmt. Dieser Zusammenhang kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,7$ als gesichert angesehen werden. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass sich bei gleicher Packungsdichte der gleiche Fließmittelbedarf ergibt – unabhängig von der Art des Sandes. 13 Natursande und 9 Brechsande erforderten einen Fließmittelbedarf $< 4\%$ zur Erzielung des gewählten Ausbreitfließmaßes von 240 mm mit dem Hägermann-Trichter. Das entspricht der üblichen Größenordnung für die Fließmitteldosierung. Ein Natursand und 2 Brechsande benötigten einen deutlich höheren Fließmittelbedarf und mit 3 Brechsanden konnte kein Fließen erzielt werden.

Zusammenfassend lässt sich aus den vorliegenden Versuchsergebnissen ableiten, dass die Packungsdichte als entscheidende Schüttguteigenschaft sowohl von der Korngrößenverteilung als auch von der Kornform beeinflusst wird. Gleiche Packungsdichten führen zu annähernd gleichem Verhalten, wie beispielsweise dem Fließverhalten von Mörtelsuspensionen, die mit den untersuchten Schüttgütern hergestellt wurden. Damit kann die Packungsdichte als erstes Entscheidungskriterium für eine Verwertung der Brechsande im Selbstverdichtenden Beton herangezogen werden. Aus **Bild 6** lässt sich ziemlich eindeutig ableiten, dass alle Sande mit Packungsdichten $< 0,6$ für eine solche Verwertung nach Aussage dieses Tests für den SVB nicht geeignet sind. Das würde von allen untersuchten Sanden 10 Brechsande, aber auch 5 Natursande betreffen. Nach dieser Vorauswahl sind weitere rheologische und betontechnologische Tests erforderlich, um eine endgültige Eignung zu verifizieren.

In **Bild 7** wurde abschließend die geologische Herkunft der Sande im Zusammenhang mit der Sphärizität betrachtet. Die vorhandenen Datenpunkte zu Packungsdichte und SPHT wurden mit der Gesteinsart gekennzeichnet. Danach lassen sich die verschiedenen Gesteinsarten eindeutig bestimmten SPHT-Bereichen zuordnen. So steigt die Sphärizität von Natursand mit der besten Sphärizität über Rhyolith und Kalkstein kontinuierlich bis zum Diabas mit den höchsten SPHT-Werten an.

Schrifttum/References

- [1] Transportbetongeneration für erweiterte Anwendungen. Susa Wegweiser, 97 (2004) Nr. 7, S. 22/23
- [2] *Bramshuber, W., Uebachs, St. u. Eck, Th.*: Betontechnologische Grundlagen des Selbstverdichtenden Betons. In König, Holschemacher u. Dehn (Hrsg.): Selbstverdichtender Beton, Innovation im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2001
- [3] *Stieß, M.*: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer-Verlag 1992

The results show further that at the same packing density, the same amount of plasticizer is required irrespective of the type of sand. 13 natural sands and 9 crushed sands required $< 4\%$ plasticizer to achieve the selected slump flow of 240 mm with the Hägermann funnel. That corresponds to the usual range for the plasticizer dosage. One natural sand and two crushed sands needed considerably higher quantities of plasticizer and with three crushed sands no flow could be achieved.

To summarize, it can be concluded from the test results that the packing density is the crucial property of bulk materials and is influenced by both the particle size distribution and the particle shape. The same packing densities lead to approximately the same behaviour, for example, the flow behaviour of the mortar suspensions that were produced with the bulk materials studied. Accordingly, the packing density can be used as the first criterion for determining the suitability of crushed sands for use in self-compacting concrete. **Fig. 6** shows very clearly that all sands with packing densities < 0.6 are unsuitable for use in SCC based on the test results. Of all sands tested, this applied to ten crushed sands but also five natural sands. Following this preselection, further rheological and concrete specific tests are necessary to verify definite suitability.

Finally, in **Fig. 7** the geological origin of the sands is considered in relation to their sphericity. The existing data points for packing density and SPHT were labelled with the rock type. According to this, the various types of rock can be definitely allocated to certain SPHT ranges. For example, the sphericity of natural sand with the best sphericity steadily increases through rhyolite and limestone to diabase with the highest SPHT values.

- [4] *Stark, U. u. Müller, A.*: Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform. *Aufbereitungs Technik* 45 (2004) Nr. 6, S. 6/16
- [5] *Fuller, W. B. u. Thomson, S. E.*: The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of American Society of Civil Engineers*, Vol. LIX, New York, Dec. 1907
- [6] *Hummel, A.*: *Das Beton – ABC*. 12. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1959