

# Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 85

**bast**

# Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®

von

Kirsten Kunz

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch Gladbach

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 85**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt F1100.3211004.01:**  
Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikel-  
messgerät „Camsizer®“

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323

ISBN 987-3-95606-122-6

Bergisch Gladbach, November 2014

## Kurzfassung – Abstract

### Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“

In dem Projekt „Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ sollte geprüft werden, inwieweit es möglich ist, Brech- und Natursande der Korngröße 0,063 bis 2 mm zu unterscheiden und charakteristische Kornformmerkmale zu bestimmen. Dafür wurden neben konventionellen Prüfverfahren, wie die Korngrößenverteilung und der Fließkoeffizient, Messungen mit dem optischen Messgerät „Camsizer®“ der Firma Retsch Technology durchgeführt. Mit dem Messgerät ist es möglich die Partikelverteilung als auch die Kornform von trockenen und rieselfähigen Schüttgütern festzustellen. Zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist es jedoch erforderlich die Genauigkeit des Prüfverfahrens zu überprüfen. Dafür wurden die Richtigkeit und die Präzision der Messungen überprüft. Zur Einschätzung der Richtigkeit des Messverfahrens wurden die mittlere Partikelverteilung der „Camsizer®“-Messung und die konventionelle Sieblinie nach DIN EN 933-1 als Bezugsgröße gewählt. Es konnte an Hand von vier Sandproben eine zufriedenstellende Übereinstimmung festgestellt werden. Zur Einschätzung der Präzision des Messverfahrens wurden die Übereinstimmung der Partikelverteilung und die Formparameter der Sphärizität je Teilprobe betrachtet. Die festgestellte Übereinstimmung war groß. Daher ist die Genauigkeit des Prüfverfahrens positiv einzuschätzen.

Die Hauptuntersuchungen wurden an 69 Brech- und Natursandproben durchgeführt. Als Bewertungsgrundlage wurde zunächst der Fließkoeffizient ermittelt und die Korngrößenverteilung nach DIN 933-1 bestimmt. Mit dem optischen Messgerät wurden vier Teilproben je Sand gemessen. Aus den Einzelwerten der Teilprobe wurden die mittlere Partikelverteilung bzw. für die Formparameter der Sphärizität, der Symmetrie oder des Breiten-/Längenverhältnisses die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ bestimmt. Die Prüfergebnisse wurden statistisch unter Beachtung von Messunsicherheiten ausgewertet.

Die Partikelmessungen mit dem optischen Partikelmessgerät zeigen, dass es möglich ist, anhand von Formparametern und der Partikelgrößenverteilung, Kornformeigenschaften von feinen Gesteinskörnungen festzustellen. Es ist jedoch nicht möglich,

eindeutige Unterscheidungsmerkmale zwischen Brech- und Natursand festzulegen.

Da sich in der Praxis Brechsande für den Einsatz im Asphalt bewährt haben, ist für die Praxis von Interesse, bei welchen Parametern es sich um zweckmäßige Einflussgrößen handelt und wie die unterschiedlichen Formkenngrößen sich in Gemischen aus Gesteinskörnungen, Asphalten oder Betonen auswirken.

### Assessment of grain shape with the optical particle analyser “Camsizer®“

The extent to which it is possible to differentiate crushed sands and natural sands of 0.063 to 2 mm in grain size and determine characteristic grain shape properties should be examined in the project “Assessment of grain shape with the optical particle analyser ‘Camsizer®‘. For this, measurements using the optical measuring device “Camsizer®“ from Retsch Technology were carried out alongside conventional test methods, such as grain size distribution and flow coefficient. With the measuring instrument, it is possible to determine the particle distribution as well as the grain shape of dry and free-flowing bulk materials. However, it is necessary to check the accuracy of the test method for the reproducibility of the results. The accuracy and precision of the measurements were therefore reviewed. To assess the accuracy of the measurement process, the average particle distribution of the “Camsizer®“ measurement and the conventional grain-size distribution curve were chosen as a reference value according to DIN EN 933-1. A satisfactory correlation could be determined on the basis of four sand samples. To assess the precision of the measurement process, the conformity of the particle distribution and the shape parameters of the sphericity of each subsample were looked at. The correlation ascertained was sizable. Therefore, the accuracy of the test method is considered positive.

The main investigations were carried out on 69 crushed sands and natural sands. As the valuation basis, the flow coefficient was first ascertained and the grain size distribution was determined according to DIN 933-1. Four subsamples of each

sand were measured with the optical measuring device. The average particle distribution or the “distinguishing shape characteristics“ for the shape parameters of the sphericity, the symmetry or the length-to-width ratio were determined from the individual values of the subsamples. The test results were statistically evaluated allowing for measurement inaccuracy.

The particle measurements with the optical particle analyser show that it is possible to determine grain shape properties of fine aggregates based on shape parameters and the particle size distribution. However, it is not possible to define clear distinguishing features between crushed sands and natural sands.

Since crushed sands have proven successful for use in asphalt, the parameters for which appropriate characteristics are of concern is of practical interest as well as how the different shape parameters have an effect in mixtures made of aggregates, asphalt or concrete.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> . . . .	7	<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Voruntersuchungen</b> . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Aufgabe und Vorgehensweise</b> . . . . .	8	8.1	Messeinstellungen . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b> . . . . .	8	8.1.1	Konfiguration des Messgerätes . . . . .	16
3.1	Allgemeines . . . . .	8	8.1.2	Messdichte der Partikel . . . . .	19
3.2	Konventionelle Prüfverfahren . . . . .	9	8.1.3	Partikelgröße . . . . .	20
3.3	Grundlagen der Partikeltechnologie . . . . .	9	8.2	Genauigkeit des Prüfverfahrens . . . . .	20
3.3.1	Partikelgröße . . . . .	9	8.2.1	Richtigkeit des Prüfverfahrens . . . . .	20
3.3.2	Formparameter . . . . .	9	8.2.2	Präzision des Prüfverfahrens . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Untersuchungsmaterialien, Vorbereitung der Proben und konventionelle Prüfungen</b> . . . . .	10	8.2.3	Einschätzung der Genauigkeit . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Optisches Messgerät „Camsizer®“</b> . . . . .	11	8.3	Zusammenfassung der Voruntersuchungen . . . . .	24
5.1	Technische Informationen . . . . .	11	<b>9</b>	<b>Ergebnisse der Hauptuntersuchungen</b> . . . . .	25
5.2	Partikelmessmethode . . . . .	12	9.1	Konventionelle Prüfmethoden . . . . .	25
5.3	Anwendung . . . . .	13	9.1.1	Fließkoeffizient . . . . .	25
5.3.1	Erstellung einer Messaufgabe . . . . .	13	9.1.2	Korngrößenverteilung . . . . .	26
5.3.2	Durchführung einer Messung . . . . .	13	9.2	Messungen mit dem optischen Partikelmessgerät . . . . .	26
5.4	Auswertung der Messungen . . . . .	14	9.2.1	Partikelgrößenverteilung . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Voruntersuchungen</b> . . . . .	14	9.2.2	Ergebnisse der Einzelbildauswertung . . . . .	27
6.1	Messeinstellungen . . . . .	14	9.2.3	Ergebnisse der Formkenngrößenbestimmung . . . . .	27
6.1.1	Konfiguration des Messgerätes . . . . .	14	9.2.3.1	Formkenngröße der Sphärizität . . . . .	29
6.1.2	Einstellung der Messdichte der Partikel . . . . .	14	9.2.3.2	Formkenngröße der Symmetrie . . . . .	32
6.1.3	Partikelgröße . . . . .	15	9.2.3.3	Formkenngröße des Breiten-/Längenverhältnisses . . . . .	33
6.2	Genauigkeit des Prüfverfahrens . . . . .	15	9.2.4	Ergebnisse der Formkenngrößenbestimmung nach Kornklassen . . . . .	33
6.2.1	Grundlagen . . . . .	15	9.2.4.1	Formkenngröße der Sphärizität in Abhängigkeit von der Kornklasse . . . . .	33
6.2.2	Richtigkeit des Prüfverfahrens . . . . .	15	9.2.4.2	Formkenngröße der Symmetrie in Abhängigkeit von der Kornklasse . . . . .	36
6.2.3	Präzision des Prüfverfahrens . . . . .	16			
<b>7</b>	<b>Hauptuntersuchungen</b> . . . . .	16			
7.1	Konventionelle Prüfmethoden . . . . .	16			
7.2	Messungen mit dem optischen Partikelmessgerät . . . . .	16			

9.2.4.3	Formkenngröße des Breiten-/Längenverhältnisses in Abhängigkeit von der Kornklasse . . . . .	37
9.2.5	Poliermittel Korund . . . . .	38
<b>10</b>	<b>Beurteilung der Ergebnisse. . . . .</b>	<b>39</b>
<b>11</b>	<b>Bewertung des Prüfverfahrens und Ausblick . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung. . . . .</b>	<b>40</b>
<b>13</b>	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>41</b>

## 1 Einleitung und Problemstellung

Feine Gesteinskörnungen beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften von Asphalt und Beton, als auch die Eigenschaften von Gemischen aus Gesteinskörnungen. Mit Umsetzung der europäischen Normen und Einführung der TL Gestein-StB sind zunächst die bekannten Begriffe „Brechsand“ und „Natursand“ zur Charakterisierung von Sanden und Gemischen aus Gesteinskörnungen entfallen. Eine allgemeinverbindliche Festlegung zur Beschreibung von Kornform und Oberflächenrauheit von feinen Gesteinskörnungen gibt es derzeit nicht. Die Charakterisierung der Kornklasse 0,063 bis 2 mm erfolgt durch die Bestimmung des Fließkoeffizienten. Dieser ist der Ausflusszeit in Sekunden gleichgesetzt, die eine definierte Menge Sand durch einen definierten Trichter fließt. Zur Klassifizierung der Kantigkeit werden nach DIN EN 13043 feine Gesteinskörnungen entsprechend des Fließkoeffizienten in Kategorien  $E_{CS}$  38,  $E_{CS}$  35,  $E_{CS}$  30 und  $E_{CS} < 30$  eingeteilt.

Im Rahmen des AP-Projektes 03 371/S7 der BAST „Bestimmung des Fließkoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand im Asphalt“ wurde festgestellt, dass es sich bei einem Fließwert  $E_{CS}$  größer 35 um einen Brechsand und bei einem Fließwert  $E_{CS}$  kleiner 30 um einen Natursand handelt (siehe Bild 1). In der Kategorie  $E_{CS} \geq 30$  und  $E_{CS} < 35$  gibt es einen Überschneidungsbereich, sodass keine eindeutige Zuordnung auf die Gewinnungsart Natur- oder Brechsand getroffen werden kann (KUKIES, 2004).

Forschungsergebnisse der TU München weisen nochmals deutlich darauf hin, dass der Fließkoeffizient ungeeignet ist, die Angabe des Brechsand/Natursand-Verhältnisses zu ersetzen (WÖRNER, STÜTZ, WESTINER, 2008). In der Niederschrift des AA 6.1 wird unter Berufung auf die Forschungsergebnisse der TU München festgehalten, dass der Fließkoeffizient die Angaben des Brechsand/Natursand-Verhältnisses nicht ersetzen kann. Es können gewisse Sandeigenschaften damit herausgestellt werden, er scheint aber ungeeignet, um

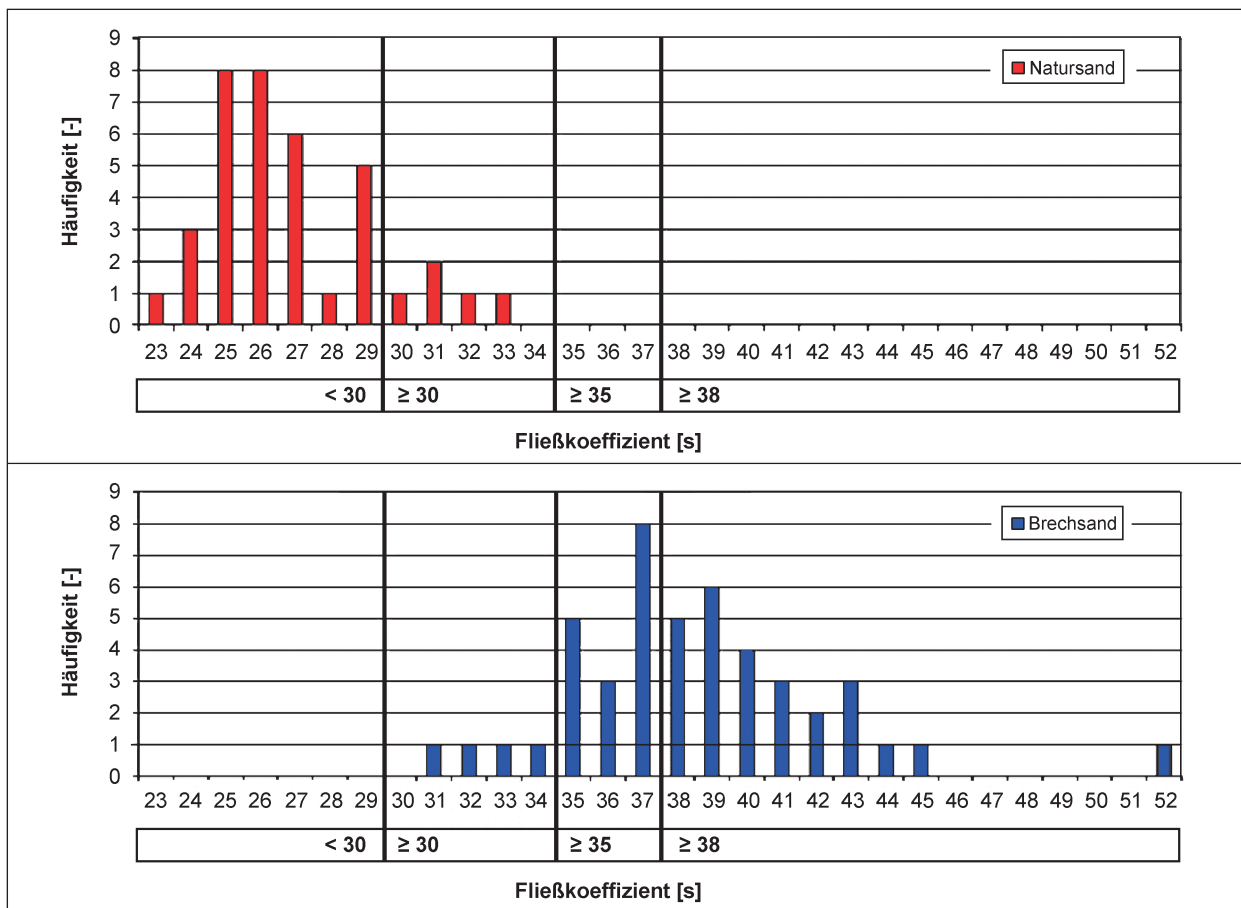


Bild 1: Häufigkeitsverteilung der Fließkoeffizienten von Natursand und Brechsand (KUKIES, 2004)



als Basis für vertragliche Anforderungen zu dienen (AA 6.1, Niederschrift 09/2009). In den Praxisinformationen der Arbeitsgruppe 6 wurde anschließend veröffentlicht, dass der Fließkoeffizient als Anforderungswert kritisch anzusehen ist, praxisbewährte Brechsande sollten vom Einsatz in Asphalt nicht ausgeschlossen werden und für das Verformungsverhalten von Asphalt sollte bei der Erstprüfung das Brechsand/Natursand-Verhältnis ermittelt werden (FGSV, 2010).

Auch in neueren Untersuchungen der TU München wurde bestätigt, dass es sich bei dem Fließkoeffizienten um einen „Summenparameter“ handelt, der von der Korngrößenverteilung als auch von der Kornform und der Oberfläche beeinflusst wird, und daher keine Rückschlüsse auf Einzelmerkmale möglich sind (WÖRNER, NEIDINGER, WESTINER, 2012).

Erste Untersuchungen mit der computerunterstützten Partikelmessung zeigten, dass als Alternative zum Fließkoeffizienten das fotooptische Verfahren eine Möglichkeit darstellt, die Kornform und die Oberflächenrauheit zu erfassen (WÖRNER, STÜTZ, WESTINER, 2008).

Weitere Untersuchungen der TU München zeigten, dass die Beschreibung der granulometrischen Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen über fotooptische Messsysteme prinzipiell möglich ist (WÖRNER, NEIDINGER, WESTINER, 2012).

## 2 Aufgabe und Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel, feine Gesteinskörnungen der Kornklasse 0,063 bis 2 mm mit Unterstützung eines optischen Partikelmessgerätes zu charakterisieren. Es soll geprüft werden, ob mit einem optischen Partikelmessgerät die Unterscheidung von Brech- und Natursanden möglich ist und Unklarheiten, die bei der Interpretation des Fließkoeffizienten bestehen, eingegrenzt werden können. Von dem AP-Projekt 03 371/S7 „Bestimmung des Fließkoeffizienten feiner Gesteinskörnungen und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand im Asphalt“ stehen noch 69 Natur- und Brechsande zur Verfügung, die für die weiteren Prüfungen herangezogen werden sollen.

Zunächst ist vorgesehen, neben den konventionellen Prüfverfahren, die Grundlagen der Partikeltechnologie, wie die Definition von Partikelgröße und

<p><b>Grundlagen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konventionelle Prüfverfahren</li> <li>• Grundlagen der Partikeltechnologie (Partikelgröße, Formparameter)</li> <li>• Messprinzip eines optischen Partikelmessgerätes</li> </ul>
<p><b>Voruntersuchungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Messeinstellungen (Gerätekonfiguration, Einstellung der Messdichte, Partikelgröße)</li> <li>• Genauigkeit des Prüfverfahrens als Oberbegriff für die Richtigkeit und Präzision</li> </ul>
<p><b>Hauptuntersuchungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung konventioneller Prüfmethoden</li> <li>• Messungen mit dem optischen Partikelmessgerät</li> </ul>

Tab. 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

Partikelform, auch das Messprinzip eines optischen Partikelmessgerätes darzustellen (siehe Tabelle 1).

In Voruntersuchungen werden die Messeinstellungen am optischen Partikelmessgerät, wie beispielsweise die Konfiguration des Gerätes, festgelegt. Ebenso werden an einzelnen Sandproben die Genauigkeit des Messverfahrens und die Wiederholbarkeit der Messungen an verschiedenen Sanden geprüft.

In den Hauptuntersuchungen werden 69 Natur- und Brechsande untersucht. Zunächst werden die konventionellen Prüfverfahren, wie die Korngrößenverteilung – Siebverfahren nach DIN EN 933-1 und der Fließkoeffizient nach DIN EN 933-6 durchgeführt. Anschließend finden Untersuchungsreihen mit dem optischen Partikelmessgerät statt. Die Partikelgrößen und Formparameter werden nach dem bisherigen Kenntnisstand zur Beschreibung feiner Gesteinskörnungen ausgewählt. Neben der Darstellung der Partikelgrößenverteilung werden die Messungen nach Formparametern ausgewertet und das Prüfverfahren anschließend bewertet.

Zuletzt soll noch geprüft werden, ob das Partikelmessgerät zur Qualitätskontrolle von Poliermitteln, wie sie beim PSV Versuch und beim Polierverfahren Wehner/Schulze, eingesetzt werden kann.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Allgemeines

Feine Gesteinskörnungen können durch natürlichen Zerfall von Festgestein oder Kies entstehen oder durch die mechanische Aufbereitung von Festgestein oder Kies oder durch die Aufbereitung industriell hergestellter Gesteinskörnungen herge-

stellt werden (FGSV, 2007). Maßgebende Einflussfaktoren für die Eigenschaften von Gesteinskörnungen sind der Mineralbestand, das Gefüge, die Entstehung und die Aufbereitung. Die Anforderungen an natürliche, industriell hergestellte und rezyklierte Gesteinskörnungen sind in den TL-Gestein-StB unter Berücksichtigung der Europäischen Normen enthalten.

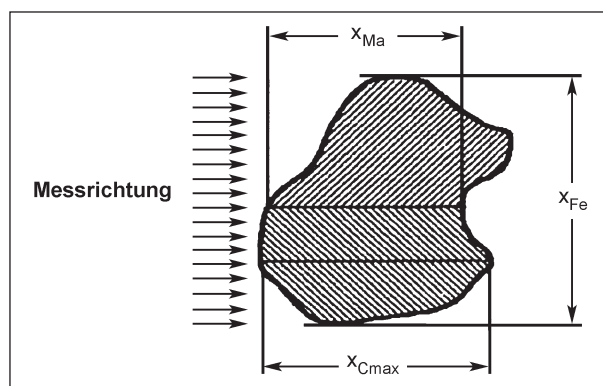
### 3.2 Konventionelle Prüfverfahren

Die allgemeine Charakterisierung von Gesteinskörnungen findet üblicherweise durch die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 statt. Feine Gesteinskörnungen (0,063/2 mm) werden bislang über den Fließkoeffizient nach DIN EN 933-6 charakterisiert. Zur Beschreibung der Kornform von groben Gesteinskörnungen existieren im Regelwerk verschiedene Prüfverfahren. Die Kornform wird über die Plattigkeitskennzahl nach DIN EN 933-3 oder die Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4 bestimmt. Die Oberflächenbeschaffenheit wird bei Gesteinskörnungen > 4 mm über den Anteil an gebrochenen Körnern nach DIN EN 933-5 ermittelt. Im Forschungsprojektes (WÖRNER, NEIDINGER, WESTINER, 2012) konnte nachgewiesen werden, dass die Plattigkeitskennzahl bis zu einer kleinsten Korngröße von 1,25 mm problemlos bestimmt werden kann.

### 3.3 Grundlagen der Partikeltechnologie

#### 3.3.1 Partikelgröße

Zur Unterscheidung von Partikeln werden diesen Merkmale zugewiesen. Wichtige Unterscheidungsmerkmale sind neben der Partikelverteilung, die Partikelgröße und die Form der Partikel. Die Größe eines Partikels wird von der Gestalt und Oberfläche beeinflusst. Für die Partikelgröße wird allgemein der Buchstabe „x“ verwendet, damit ist die Angabe eines charakteristischen Längenmaßes gemeint. Häufig wird zur Bestimmung der Partikelgröße eine statistische Länge entlang einer Messrichtung erfasst. Die Abmessungen werden an der Projektionsfläche des jeweiligen Partikels in Messrichtung festgelegt. Auch bei Partikeln gleicher Größe und Form („Gleichkorn“) schwanken die statistischen Längen je nach der zufälligen räumlichen Lage der Partikel zur Projektions- und Messrichtung zwischen einem größten und einem kleinsten Wert.



**Bild 2:** Definitionen von statistischen Längen an der Einzelpartikel-Projektion (STIEß, 2009)

Nachfolgend sind einige gebräuchliche statistische Längen definiert. Die Definitionen „Feretdurchmesser“ und „Martindurchmesser“ sind trotz der Bezeichnung keine Durchmesser (STIEß, 2009).

- $x_{Fe}$ : Feretdurchmesser: Länge der Projektion des Partikelbildes senkrecht zur Messrichtung,
- $x_{Ma}$ : Martindurchmesser: Länge der Strecke, welche die Projektionsfläche parallel zur Messrichtung halbiert,
- $x_{Cmax}$ : Längste Sehne durch die Partikelprojektion parallel zur Messrichtung.

Eine Weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Partikelgröße ist der Äquivalentdurchmesser.

- $x_{area}$ : Entspricht dem Durchmesser eines Kreises, der die gleiche Fläche wie die betrachtete unregelmäßige Partikelprojektion hat (STIEß, 2009).

#### 3.3.2 Formparameter

In der Statistik werden Formparameter wie beispielsweise die Symmetrie verwendet, um etwas über die Gestalt bzw. die Form einer Verteilung auszusagen (SCHULZE, 2007).

Zur Charakterisierung von Partikeln ist aus der Literatur eine Vielzahl von „speziell definierten Formfaktoren“ bekannt. Eine allgemeine Definition, auf welche die meisten anderen zurückzuführen sind, ergibt sich aus dem Vergleich zweier unabhängig voneinander an einem Partikel gemessener Größen  $x_\alpha$  und  $x_\beta$ . Dieses Verhältnis der beiden Größen wird Formfaktor genannt (STIEß, 2009):

$$\Psi_{\alpha, \beta} = \frac{x_\alpha}{x_\beta}$$

Ein speziell definierter Formfaktor ist die Sphärizität. Der Begriff der Sphärizität wurde 1932 von dem Geologen Hakon Wadell als das Verhältnis zweier Oberflächen definiert:

$$\Psi_{Wa} = \frac{\text{Oberfläche der volumengleichen Kugel}}{\text{tatsächliche Oberfläche}}$$

„Die Sphärizität ( $\Psi_{Wa}$ ) eines Körpers ist das Verhältnis der Oberfläche einer Kugel gleichen Volumens zu der tatsächlichen Oberfläche eines Partikels“. Demnach hat die Kugel von allen Körpern gleichen Volumens die kleinste Oberfläche, daher nimmt der Nenner in der Sphärizität für alle Nicht-Kugeln einen größeren Wert an als der Zähler und demzufolge ist  $\Psi_{Wa} < 1$  (STIEß, 2009). Der Formparameter der Sphärizität ist unabhängig von der Orientierung (HÖLZER, 2007).

Basierend auf der zuvor genannten Grundlage lassen sich über den Vergleich von Umfang und Fläche ebene Formparameter bestimmen. Ein sehr häufig verwendeter Formparameter ( $f$ ) vergleicht den Umfang ( $U$ ) der Partikelprojektion mit dem eines Kreises gleicher Fläche ( $A$ ). Der Formfaktor ( $f < 1$ ) kennzeichnet pauschal die Abweichung von der Kreisform (KOLLENBERG, 2004):

$$f = \frac{4 \pi A}{U^2}$$

## 4 Untersuchungsmaterialien, Vorbereitung der Proben und konventionelle Prüfungen

Im Rahmen des AP-Projektes 03 371/S7 „Bestimmung des Fließkoeffizienten feiner Gesteinskörnungen und deren Auswirkungen auf den Verformungswiderstand im Asphalt“ wurden 2003 Natur- und Brechsandproben beschafft. Davon waren noch 69 Rückstellproben der Korngröße 0,063 bis 2 mm vorhanden, die für das Forschungsprojekt herangezogen wurden. Die Gesteinsproben setzen sich aus 32 Natursandproben und 33 Brechsandproben aus dem gesamten Bundesgebiet, einer Brechsandprobe aus Schweden und drei Brechsandproben aus Norwegen zusammen. Nachfolgend sind die Gesteinsarten aufgeführt, die für die Untersuchungen verwendet wurden (siehe Tabelle 2).

<b>Brechsande</b>	Andesit, Basalt, Diabas, Diorit, Gabbro, Gneis, Grauwacke, Kalkstein, Keratophyr, quarzistischer Sandstein, Quarzporphyr, Syenit, gebr. Kies, gebr. Moräne, Granit (Schweden), Anorthosit (Norwegen), Granodiorit (Norwegen)
<b>Natursande</b>	Kies, Moräne, Alpine Moräne

Tab. 2: Übersicht der im Projekt geprüften Gesteinsarten

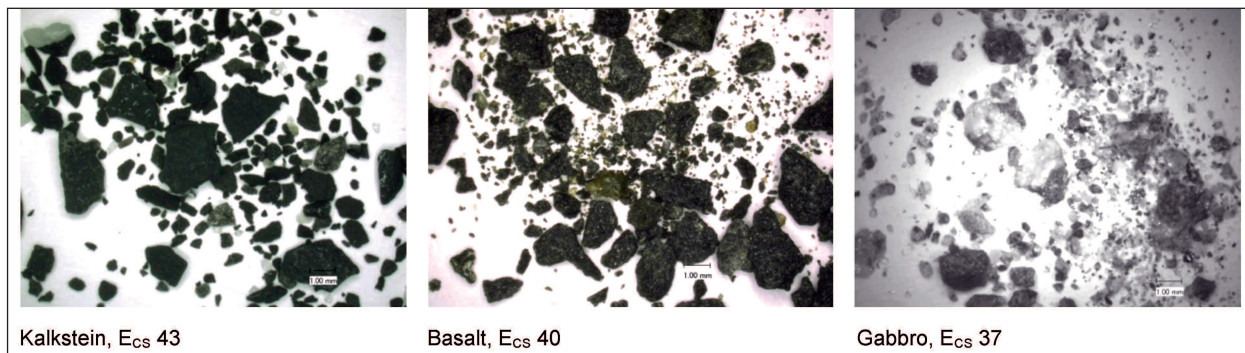


Bild 3: Drei unterschiedliche Proben Brechsand und der ermittelte Fließkoeffizient ( $E_{CS}$ )

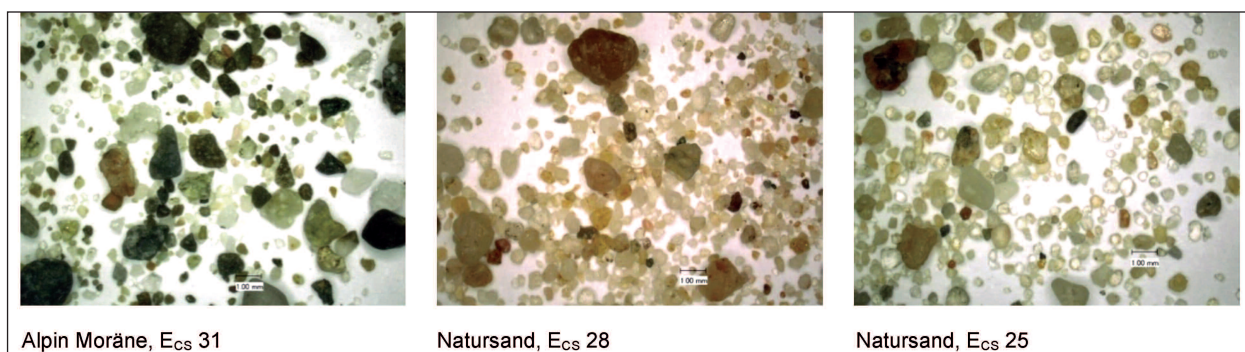


Bild 4: Drei unterschiedliche Proben Natursand und der ermittelte Fließkoeffizient ( $E_{CS}$ )

Um die Wiederholpräzision der Ergebnisse gewährleisten zu können, ist eine äußerst sorgfältige Probeentteilung und Vorbereitung der Materialien notwendig. Dafür wurde zunächst jede Sandprobe mit dem Riffelteiler nach DIN EN 932-2 auf eine Menge von ca. 1.700 g reduziert. Danach wurden die Sande gewaschen, gesiebt und das Über- und Unterkorn entfernt. Von jeder Sandprobe wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 und der Fließkoeffizient nach DIN EN 933-6 bestimmt. Für die Messungen mit dem „Camsizer®“ wurden die Messproben nochmal mit dem Flaschenteiler in acht Teilproben (Einzelmessproben) von ca.  $130 \pm 10$  g geteilt. Jede zweite Teilprobe wurde für die Untersuchungen mit dem „Camsizer®“ herangezogen, sodass von jedem Sand vier Messungen durchgeführt wurden und folglich für die Auswertung vier Einzelwerte zur Verfügung stehen. Für die Voruntersuchungen wurden einzelne Sandproben aus dem Bestand ausgewählt. Die Hauptuntersuchungen wurden mit allen 69 Brech- und Natursandproben durchgeführt. Beispielhaft für die untersuchten Gesteinskörnungen ist Material von drei Brechsandproben in Bild 3 und drei Natursandproben in Bild 4 abgebildet.

## 5 Optisches Messgerät „Camsizer®“

### 5.1 Technische Informationen

Es gibt verschiedene Anbieter optischer Messgeräte. In der BAST werden die optischen Partikelmes-

sungen mit dem Messgerät „Camsizer®“ der Firma Retsch Technology durchgeführt. Alle Messergebnisse und Auswertungen beziehen sich auf Messungen mit dem „Camsizer®“.

Der „Camsizer®“ (siehe Bild 5 und Tabelle 3) ist ein optisch-elektronisches Messgerät zur Partikelanalyse und wurde entwickelt, um trockene und rieselfähige Schüttgüter im Messbereich von 30  $\mu\text{m}$  bis 30 mm zu charakterisieren. Das Messprinzip basiert auf der dynamischen digitalen Bildverarbeitung nach ISO 13322-2 (Retsch Technology, 2010).

Messprinzip	Dynamische digitale Bildverarbeitung (ISO 13322-2)
Messbereich	30 $\mu\text{m}$ -30 mm
Art der Analyse	Trockenmessung von Pulvern und Granulaten
Messzeit	Ca. 5 bis 15 Minuten abhängig von Materialmenge, Korngröße und gewünschter Messstatistik
Messmethode	60 Bilder/s mit jeweils mehr als 780.000 Messpunkten (entspricht mehr als 45 Mio. Messpunkten pro Sekunde)
Abmessungen (B x H x T)	850 x 315 x 515 mm ohne Trichter
Gewicht „Camsizer®“	48 kg
Auswertestation	Computer inkl. Betriebssystem, Monitor, Tastatur, Maus, Netzwerkkarte, PC-Interfacekarte für die Hardwarekommunikation, Auswertesoftware

Tab. 3: Technische Messdaten des „Camsizers®“ (Retsch Technology, 2010)



Bild 5: Bildschirm, optisches Partikelmessgerät „Camsizer®“, PC, und Drucker

### 5.2 Partikelmessmethode

In dem optischen Messgerät „Camsizer®“ sind im Messschacht die Flächenbeleuchtungseinheit und die digitalen Kameras „CCD-Basic“ und „CCD-Zoom“ einander gegenüberliegend angeordnet (siehe Bild 6). Während des Messvorgangs findet zwischen den beiden Kameras eine Aufgabenteilung statt. Die Zoom-Kamera (im Bild blau) hat einen kleineren Aufnahmebereich. Sie erfasst die kleinen Partikel in hoher Auflösung und misst Partikel bis 1,25 mm. Größere Partikel können nicht mehr zuverlässig gemessen werden. Die Basic-Kamera (im Bild rot) hat eine geringere Auflösung, erfasst jedoch die gesamte Projektionsfläche (siehe Bild 7) und soll dadurch eine statistische Sicherheit der Ergebnisse gewährleisten.

Zur Erfassung der Partikelgröße werden von Retsch Technology verschiedene Partikelmodelle, wie beispielsweise  $x_{c \text{ min}}$ ,  $x_{Ma \text{ min}}$ ,  $x_{area}$  und  $x_{Fe \text{ max}}$  angeboten (siehe auch Kapitel 3.3.1). Für die Bestimmung der Eigenschaften von Partikeln können verschiedene Formparameter vom „Camsizer®“ gemessen werden. Zur Charakterisierung von feinen Gesteinskörnungen werden die Formparameter der Sphärizität (SPHT), der Symmetrie (Symm) und das Breiten-/Längenverhältnis (b/l) als Kenngrößen empfohlen (siehe Kapitel 3.3.2 und Tabelle 4). Die Grundlage des Messprinzips von Retsch Technology basiert auf der Annahme, dass ein völlig runder Körper wie eine Kugel eine Sphärizität (SPHT) von 1 aufweist und für jede andere Körperform sich eine

Sphärizität  $< 1$  ergibt (siehe DIN ISO 9276-6). Der Begriff der Symmetrie stammt aus dem altgriechischen und bedeutet Ebenmaß oder Gleichmaß. In der Geometrie wird ein Objekt als symmetrisch charakterisiert, wenn es durch bestimmte lineare Abbildungen auf sich selbst abgebildet wird (WAGNER, 2010). Retsch Technology definiert die symmetrischen Eigenschaften eines Körpers mit Hilfe der

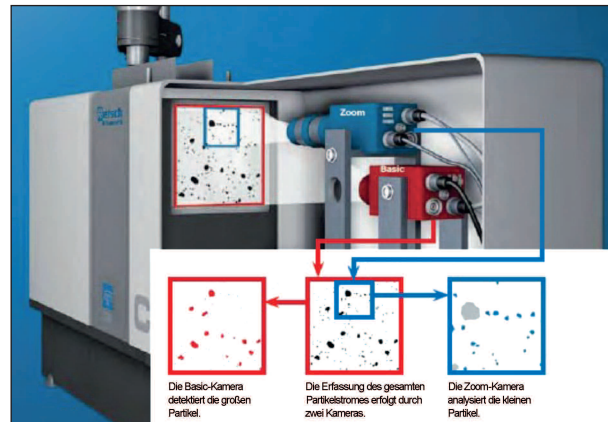


Bild 6: Einblick in das optische Messsystem, mit dem Aufnahmebereich der Basic-Kamera (rot) und der Zoom-Kamera (blau), (Retsch Technology, 2007)

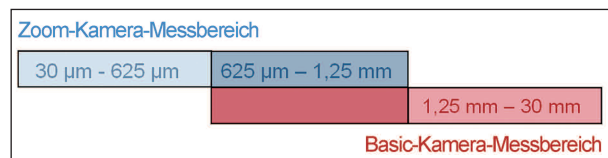


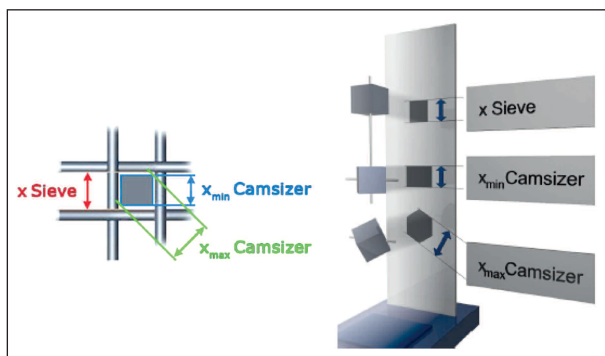
Bild 7: Überschneidungsbereich der beiden Kameras (Retsch Technology, 2012)

SPHT – Sphärizität	$\frac{4\pi A}{U^2}$ <p>A – gemessene Fläche einer Partikelprojektion U – gemessene Ausdehnung (Umfang) einer Partikelprojektion (siehe DIN ISO 9276-6)</p>	
Symm – symmetrische Eigenschaften	$\frac{1}{2} \left( 1 + \min \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \right)$ <p><math>r_1</math> und <math>r_2</math> sind die Abstände des Flächenschwerpunktes zu den Rändern in der gegebenen Messrichtung.</p>	
b/l – Breiten-/Längenverhältnis	$x_{c \text{ min}}/x_{Fe \text{ max}}$	

Tab. 4: Definitionen von Formparametern zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen (Retsch Technology, 2010)

Abstände des Flächenschwerpunktes zu den Rändern in der gegebenen Messrichtung. Für asymmetrische Partikel ist die Symmetrie ( $S_{\text{Symm}} < 1$ ). Das Breiten-/Längenverhältnis wird bestimmt durch das Verhältnis der kleinsten Breite ( $x_{c \text{ min}}$ ) zur maximalen Länge ( $x_{F_e \text{ max}}$ ). Die Formkenngrößen oder Formparameter sind aufgrund ihrer Definition einheitslos und werden für jedes einzelne Partikel bestimmt. Das Messergebnis ist dann eine Zusammenfassung von Einzelpartelmessungen bei zufälliger Orientierung. Für ein aussagekräftiges Ergebnis sollten nach Angabe der Firma Retsch Technology 500.000 bis 1 Million Partikel je Probe gemessen werden. Auch nach (TROGISCH, 2003) besteht immer ein gewisser Informationsverlust bei der Auswertung der Schattenprojektion durch die Reduktion der 3-D-Realität auf ein reines 2-D-Problem. Die begründete Vernachlässigung der Dreidimensionalität der einzelnen Partikel kann durch eine umfangreiche Anzahl von Partikeln ausgeglichen werden. Je mehr Partikel gemessen werden, desto gesicherter sind die Werte.

Je nach Partikel können sich bei der „Camsizer®“-Messung systematische Abweichungen von der



**Bild 8:** Darstellung einer Siebgröße und die maximale und minimale Partikelgröße, die der Siebgröße zugeordnet wird (DÜFFELS, 2010)

Siebung nach DIN EN 933-1 ergeben. Da die Partikel während der Messung im freien Fall und aus einer beliebigen Perspektive aufgenommen werden, kann ein dreidimensionales Partikel in Abhängigkeit von seiner Orientierung und Form verschiedene zweidimensionale Ansichten (Projektionen) annehmen. Aufgrund dessen können bei ungleichmäßigen Partikeln breitere Größenverteilungen gemessen werden (Retsch Technologie, 2010 und DÜFFELS 2010). Im Bild 8 sind eine Sieböffnungsweite und die maximale und minimale Partikelgröße, die dem Sieb zugeordnet wird, dargestellt.

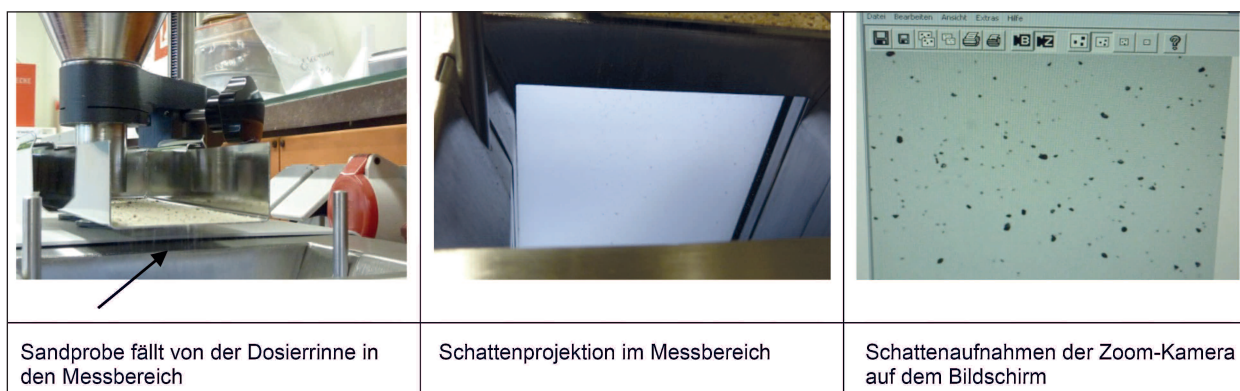
## 5.3 Anwendung

### 5.3.1 Erstellung einer Messaufgabe

Zunächst ist es notwendig, das optische Messgerät „Camsizer®“ für die zu prüfenden Gesteinskörnungen entsprechend der Partikelform zu editieren. Grundsätzliche Messeinstellungen, wie beispielsweise die Messdichte der Partikel, sollten vor einer Messreihe festgelegt werden. Des Weiteren sollten die Rinnen- und Trichterparameter für den Start der Messung, die Anzahl der Bildspeicherungen sowie die Einstellungen der Messklassen (Korngrößen) und die Partikelgrößen und Formparameter festgelegt werden. Zuletzt wird die „Messaufgabe“ gespeichert und alle nachfolgenden Messungen werden mit den getroffenen Einstellungen durchgeführt.

### 5.3.2 Durchführung einer Messung

Die Probe wird in den Trichter eingefüllt und über die Dosierrinne wird das Material dem Messschacht zugeführt, sodass alle Partikel einzeln in den Erfassungsbereich fallen (siehe Bild 9). Am Anfang der Messung erfolgt die Dosierung der Materialmenge computergesteuert über die Stärke der Rinnen-



**Bild 9:** Sandprobe auf der Dosierrinne, Schattenprojektion im Messbereich und Schattenaufnahmen

vibration und die Höheneinstellung des Trichters. Während der Messung justiert sich die Rinne über die festgelegte Messdichte (siehe auch Kapitel 6.1.2 und 8.1.2) der Schattenprojektion und die Bildanzahl pro Sekunde (Retsch Technology, 2010).

Im Anschluss an die elektronische Verarbeitung der Aufnahmen werden die Ergebnisse entsprechend der Informationsdichte in den individuell festgelegten Größenklassen dargestellt (Retsch Technology, 2007).

## 5.4 Auswertung der Messungen

Die Auswertung einer Messung kann entweder anzahl- oder volumenbezogen erfolgen. Die anzahlbezogene Verteilung der Partikel wird mit dem Index 0 bezeichnet und bezieht sich auf alle projizierten Partikel, inklusive der Staubpartikel und führt dadurch zu einer Überbewertung der feinen Partikel. Bei der volumenbezogenen Verteilung mit dem Index 3 werden die Partikel entsprechend ihres Volumens gewichtet, d. h. kleinste Staubpartikel, die in hoher Anzahl vorhanden sind, werden weniger berücksichtigt. Die Berechnung des Partikelvolumens basiert auf Partikeln, die während der Messung detektiert werden und einem bestimmten Volumenmodell, welches werksseitig eingestellt ist (Retsch Technology, 2010).

Die statistische Auswertung der Messungen erfolgte in Anlehnung an das Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1 (FGSV, 2000). Für die Auswertung wurde festgelegt, dass aus den Einzelwerten der vier Teilproben (siehe Kapitel 4) Mittelwerte (MW) gebildet, als Maß für die Streuung der Messwerte die Spannweite ( $w_4$ ) und für systematische Abweichungen die Standardabweichung ( $s$ ) berechnet werden. Außerdem wird die kritische Spannweite ( $d_r$ ) unter Wiederholbedingungen (siehe Kapitel 6.2.3) berechnet, die die Streuungen aus der Probenentzug im Labor und der Prüfung umfassen soll. Die kritische Spannweite für die jeweilige Prüfbedingung ist das Produkt aus der entsprechenden Standardabweichung  $s$  und dem Faktor  $w_p$ . Der Faktor wird mit der statistischen Sicherheit von  $P = 95\%$  und  $n = 4$  Einzelwerten ( $d_r = 3,63 \cdot s$ ) berechnet, sodass unter Wiederholbedingungen die Spannweite ( $w_4$ ) kleiner sein muss als die kritische Spannweite ( $d_r$ ).

Für jede Sandprobe werden vom „Camsizer®“ die gewählten Formparameter (SPHT<sub>0/3</sub>, Symm<sub>0/3</sub> und

b/l<sub>0/3</sub>) volumenabhängig und anzahlabhängig bestimmt und ebenso für definierte Kornklassen die Formparameter ermittelt. Die Einzelwerte (Formparameter) der Teilproben werden gemittelt und als „kennzeichnende Formkenngröße“ (FK) der Sphärität, der Symmetrie und des Breiten-/Längenverhältnisses (SPHT, Symm, b/l) bezeichnet.

Während der Messung werden eine Vielzahl von Bildern der Basic- und der Zoomkamera gespeichert, die im Einzelfall ergänzend verwendet werden können. Durch einen Mausklick auf einen Partikel ist es möglich, die zugehörigen Größen- und Formparameter angezeigt zu bekommen.

## 6 Voruntersuchungen

### 6.1 Messeinstellungen

#### 6.1.1 Konfiguration des Messgerätes

Für die Voruntersuchungen wurden einzelne Sandproben aus den zuvor genannten feinen Gesteinskörnungen ausgewählt (siehe Kapitel 4).

Die geometrisch definierten Begriffe „kugelförmig“ oder „eckig“ werden von Retsch Technology verwendet, um die Grundeinstellungen in der Software entsprechend der Partikelform zu konfigurieren. Die Unterscheidung der Einstellungen wird dadurch begründet, dass die Bilder der digitalen Kameras aus einem Raster von Bildpunkten (Pixeln) bestehen, die im Randbereich entsprechend der Annahme bewertet werden. Mit der Einstellung „kugelförmige Partikel“ werden die Pixel im Randbereich abgerundet und mit der Einstellung „eckige Partikel“ werden die Pixel im Randbereich „eckiger“ bewertet. Um festzustellen, inwieweit sich die unterschiedlichen Einstellungen auf die Messwerte auswirken, wurden Messungen an zwölf Natur- und Brechsanden mit der Grundeinstellung „kugelförmige Partikel“ und „eckige Partikel“ durchgeführt.

#### 6.1.2 Einstellung der Messdichte der Partikel

Die „Messdichte“ (Solldichte der Partikel angegeben in %) ist ein Steuerwert für das Messsystem während der Messung. Die Solldichte beeinflusst den Zustrom der Partikel in den Messschacht. An Hand der Solldichte kann die Qualität der Messung erhöht werden. Zur Festlegung der notwendigen Messdichte wurden zwei Sandproben mit einer Solldichte von 0,5 und 1,0 % gemessen.

### 6.1.3 Partikelgröße

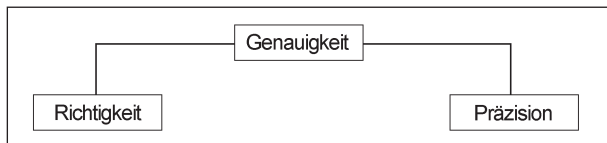
Mit dem optischen Messgerät können gleichzeitig verschieden definierte Partikelgrößen (Länge und Breite) gemessen werden. Um die Unterschiede zwischen den Definitionen zu verdeutlichen und für die Auswertung der Messungen die geeignetste Bezugsgröße auszuwählen, wurden an Hand einer Brechsandprobe die Partikelverteilungen von unterschiedlichen Partikeldefinitionen dargestellt.

## 6.2 Genauigkeit des Prüfverfahrens

### 6.2.1 Grundlagen

Zur Charakterisierung eines Messverfahrens in Hinblick auf die damit verbundene Messunsicherheit dienen nach DIN ISO 3534-1 die Begriffe Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision.

Die Genauigkeit als Oberbegriff (siehe Bild 10) ist allgemein ein Maß für die Annäherung von Messergebnissen an den „wahren Wert“ der Messgröße. Der „wahre Wert“ ist ein Begriff aus der Statistik und



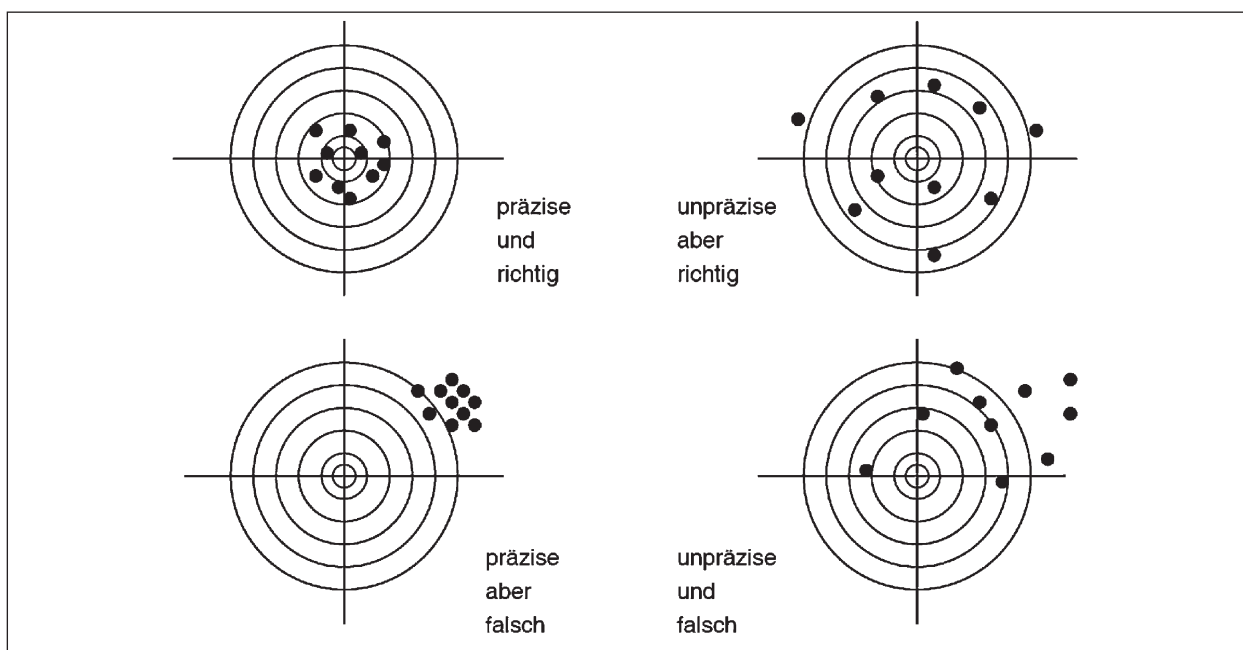
**Bild 10:** Genauigkeit als Oberbegriff von Richtigkeit und Präzision (HÄSSELBARTH, 2004)

kann je nach Festlegung ein Bezugswert oder ein Erwartungswert sein. Liegen aus einer Messreihe mehrere Messergebnisse für dieselbe Messgröße vor, kann einerseits die Richtigkeit als Übereinstimmung des Mittelwerts mit dem „wahren Wert“ betrachtet werden. Andererseits kann die Übereinstimmung der Einzelwerte untereinander, die Präzision, geprüft werden (HÄSSELBARTH, 2004).

Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten, die sich bei richtigen oder falschen bzw. präzisen oder unpräzisen Resultaten ergeben, lassen sich durch das Zielscheibenmodell beschreiben (siehe Bild 11). Das Zentrum der Scheibe symbolisiert den unbekanntes „wahren Wert“ (HÄSSELBARTH, 2004).

### 6.2.2 Richtigkeit des Prüfverfahrens

Die Richtigkeit des Prüfverfahrens einzuschätzen ist schwierig, da der „wahre Wert“ grundsätzlich unbekannt ist (HÄSSELBARTH, 2004). Zur Einschätzung der Richtigkeit des Prüfverfahrens wurde als Bezugswert („wahrer Wert“) die konventionelle Sieblinie (DIN EN 933-1) der Sande gewählt. Des Weiteren wurden vier verschiedene Sandproben entsprechend den Vorgaben in Kapitel 4 vorbereitet und je vier Teilproben mit dem „Camsizer®“ gemessen. Die Partikelverteilungen je Sand wurden gemittelt und mit dem Bezugswert verglichen. Die Differenz zwischen dem „wahren Wert“ und den Messergebnissen wird „Messabweichung“ genannt.



**Bild 11:** Zielscheibenmodell zur Darstellung der Begriffe Richtigkeit und Präzision. Das Zentrum der Scheibe symbolisiert den Bezugswert (unbekannter wahrer Wert) (HÄSSELBARTH, 2004)



### 6.2.3 Präzision des Prüfverfahrens

Bezüglich der Präzision wird unterschieden zwischen der Wiederholpräzision, der Vergleichspräzision und der Präzision unter Zwischenbedingungen. Die Untersuchungen für das Projekt wurden unter Wiederholbedingungen durchgeführt:

- dasselbe Messverfahren,
- dasselbe Labor,
- derselbe Bearbeiter,
- dasselbe Messgerät und
- Wiederholungen innerhalb einer kurzen Zeitspanne (HÄSSELBARTH, 2004).

Zur Einschätzung der Präzision des Prüfverfahrens wurden die vier zuvor ausgewählten Sandproben herangezogen und die Übereinstimmung der Ergebnisse an Hand statistischer Kenngrößen überprüft (FGSV 2000).

## 7 Hauptuntersuchungen

### 7.1 Konventionelle Prüfmethoden

Um an das zuvor genannte Projekt anzuknüpfen und um eine Bewertungsgrundlage zu schaffen, wurden zunächst von allen 69 sorgfältig vorbereiteten Brech- und Natursanden der Fließkoeffizient nach DIN EN 933-6 ermittelt.

Des Weiteren wurde die Korngrößenverteilung an allen Sandproben nach DIN EN 933-1 bestimmt.

### 7.2 Messungen mit dem optischen Partikelmessgerät

Mit dem optischen Partikelmessgerät wurde die Partikelgrößenverteilung bestimmt und der Korngrößenverteilung der konventionellen Prüfmethode gegenüber gestellt.

Die zuvor genannten 69 Brech- und Natursande wurden je Sand in acht Teilproben mit einer Menge von ca.  $130 \pm 10$  g geteilt und davon vier Teilproben mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ gemessen. Es wurden zur Charakterisierung der Sandproben die Formparameter der Sphärizität, der Symmetrie und das Breiten-Längenverhältnis ausgewählt. Für die Auswertung der Messung kön-

nen Partikel mit der Bildauswertung einzeln betrachtet werden. Außerdem können Formparameter für die gesamte Probe und für einzelne Kornklassen bestimmt werden.

## 8 Ergebnisse der Voruntersuchungen

### 8.1 Messeinstellungen

#### 8.1.1 Konfiguration des Messgerätes

Da es möglich ist, die Grundeinstellung des „Camsizer®“ entsprechend der Partikelform zu konfigurieren, wurden an zwölf Brech- und Natursanden „Camsizer®“-Messungen mit der Einstellung „kugelförmige Partikel“ und „eckige Partikel“ durchgeführt. In der Tabelle 5 sind der Siebdurchgang (S) nach DIN EN 933-1 und die Mittelwerte der „Camsizer®“-Messung mit der Einstellungen „kugelförmig Partikel“ (Ck) und eckige Partikel“ (Ce) entsprechend der Kornklasse angegeben. Die Differenzen zwischen der Siebung und der jeweiligen „Camsizer®“-Messung sind größer als die Messunterschiede zwischen den differenzierten Einstellungen. Die höchsten Unterschiede zwischen den Messergebnissen erreicht der Kalkstein in der Kornklasse 2-4 mm. Die Differenz zwischen den Natursanden sind geringer als die zwischen den Brechsanden.

Zur Verdeutlichung der Messwerte wurden exemplarisch drei Brechsandproben (Basalt, Diabas und Kalkstein) und drei Natursandproben ausgewählt und im Diagramm dargestellt (siehe Bild 12). Durch die Darstellung als Verteilungskurven wird noch einmal deutlich, dass bei den Brechsanden der Unterschied zwischen der Siebung und der „Camsizer®“-Messung größer ist als bei den Natursanden, dass jedoch zwischen der Einstellung „kugelförmige Partikel“ und „eckige Partikel“ kein nennenswerter Unterschied zu erkennen ist.

Überprüft wurde des Weiteren, inwiefern die Formparameter von der Einstellung „kugelförmige“ oder „eckige“ Partikel beeinflusst werden. Dafür wurden die Mittelwerte der vier Teilproben gebildet und als „kennzeichnende Formkenngröße“ der Sphärizität ( $FK_{SPHT3}$ ) bezeichnet. Die unterschiedlichen Einstellungen wirken sich geringfügig auf die Sphärizität aus (siehe Bild 13). Mit der Annahme „eckige Partikel“ werden meist geringfügig höhere Werte erzielt.

Korn- klasse	Basalt			Diabas			Keratophyr			Kalkstein			Alpin Moräne gebr.			Kies gebr.		
	Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %		
	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce
0,063-0,25	0,5	0,7	0,8	0,3	0,9	0,8	0,2	1,1	1,0	0,1	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4	1,1	1,0
0,25-0,5	15,2	17,8	17,0	20,2	21,8	22,4	18,5	21,8	20,1	11,9	12,4	12,7	9,3	9,1	8,6	26,5	30,9	29,3
0,5-1,0	31,1	33,5	33,9	39,1	39,6	41,5	29,4	31,6	30,7	23,2	23,2	24,5	29,3	28,0	27,2	46,0	49,0	47,7
1,0-2,0	58,0	61,3	62,3	65,4	67,6	69,1	48,9	51,6	51,0	45,5	46,8	48,6	58,6	57,3	56,3	68,3	70,7	69,0
2,0-4,0	99,9	96,7	97,1	99,9	97,7	98,1	99,7	94,9	95,2	99,7	92,7	93,7	99,7	96,0	96,2	99,9	97,3	97,3
4,0-8,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Korn- klasse	Natursand 1			Natursand 2			Natursand 3			Natursand 4			Natursand 5			Natursand 6		
	Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %			Durchgang in %		
	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce	S	Ck	Ce
0,063-0,25	0,1	0,2	0,2	0	0,3	0,2	0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4
0,25-0,5	12,3	13,2	12,6	11,8	13,5	12,7	21,8	23,1	23,4	7,4	8,4	8,6	19,4	21,5	22,8	30,5	35,4	35,2
0,5-1,0	29,5	29,9	29,7	34,2	35,5	34,4	65,2	63,3	63,6	48,5	48,3	49,0	55	55,9	57,3	61,2	63,7	64,1
1,0-2,0	60,9	61,1	61,0	67,2	68,5	67,4	81,5	81,4	81,0	83,7	83,7	83,6	82,5	83,0	83,0	89,8	90,5	90,5
2,0-4,0	99,9	96,7	97,1	99,8	98,2	98,3	99,9	98,1	98,2	100	98,6	98,7	99,9	98,8	99,0	100	99,5	99,5
4,0-8,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 5: Siebdurchgang (S) und Camsizermessungen mit der Einstellung „kugelförmige Partikel“ (Ck) und „eckige Partikel“ (Ce) von 12 Brech- und Natursanden

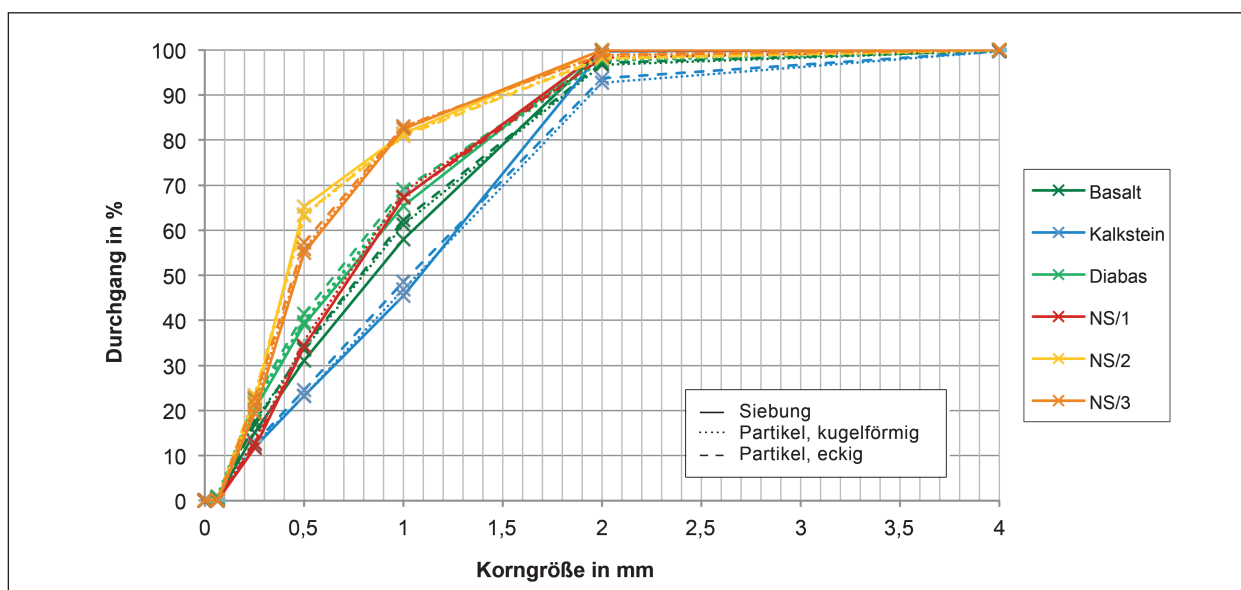


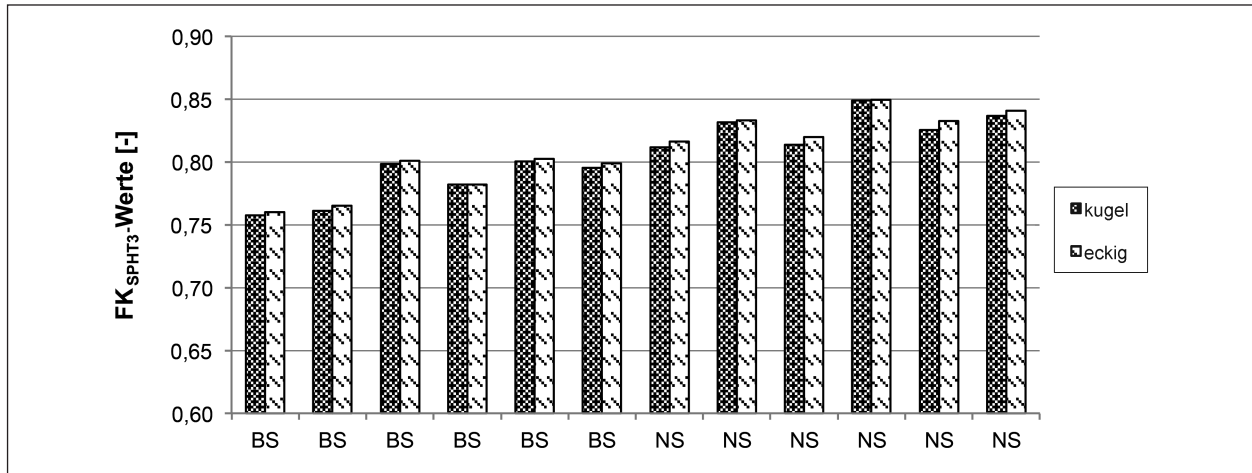
Bild 12: Sieblinie nach DIN EN 933-1 von Basalt (dunkelgrün), Kalkstein (blau), Diabas (grün) und 3 Natursandproben (rot, orange und gelb), Verteilungskurve „kugelförmige Partikel“ (Ck) und „eckige Partikel“ (Ce), Bezugsgröße  $x_{c, \min}$  für die Korngröße

Ebenso wenig wirkt sich die veränderte Einstellung auf die „kennzeichnende Formkenngröße“ der Symmetrie ( $FK_{Symm3}$ ) aus (siehe Bild 14). Die Werte weichen unerheblich voneinander ab.

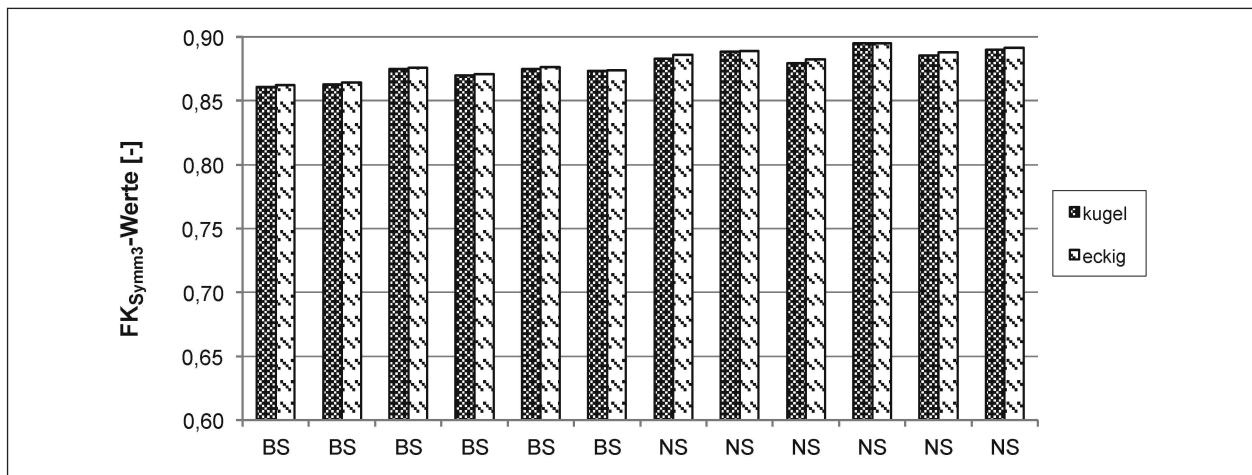
Die „kennzeichnende Formkenngröße“ ( $FK_{b/l3}$ ) des Breiten-/Längenverhältnisses verändern sich deutlich durch die Änderung der Messeinstellung, da die

minimale Breite und die maximale Länge in direktem Verhältnis zueinander stehen. Die Werte verringern sich mit der Einstellung „eckige Partikel“ um 2,8 % bis 3,9 % gegenüber der Einstellung „kugelförmige Partikel“ (siehe Bild 15).

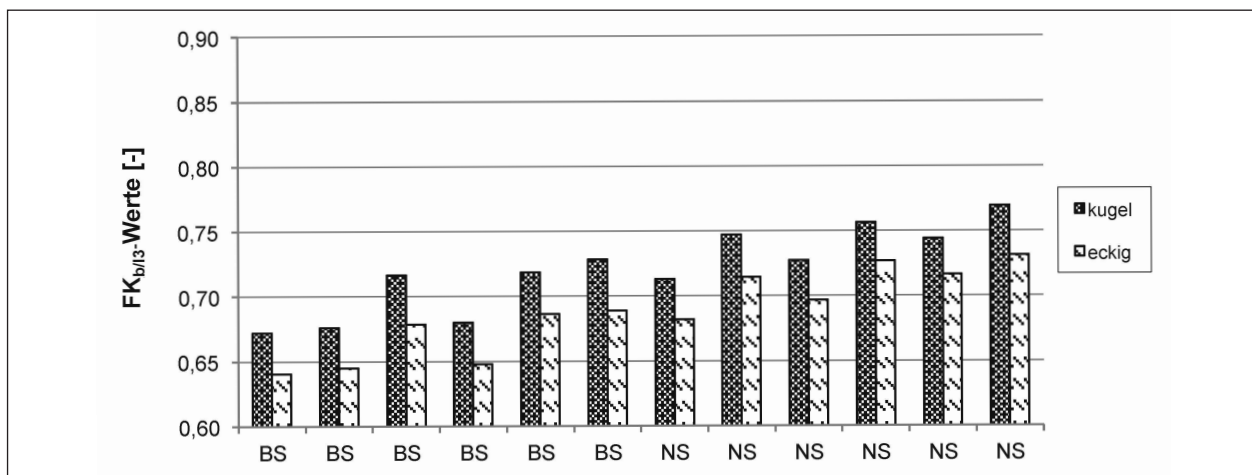
In der Tabelle 6 sind die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der 12 Brech- und Natursanden mit



**Bild 13:** Vergleich der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität ( $FK_{SPHT3}$ ), mit Änderung der Einstellung „kugelförmige“ und „eckige Partikel“, Bezugsgröße  $x_{c, min}$ , Auswertung volumenbezogen



**Bild 14:** Vergleich der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Symmetrie ( $FK_{Symm3}$ ), mit Änderung der Einstellung „kugelförmige“ und „eckige Partikel“, Bezugsgröße  $x_{c, min}$ , Auswertung volumenbezogen



**Bild 15:** Vergleich der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ des  $b/l_3$ -Verhältnis ( $FK_{b/13}$ ), mit Änderung der Einstellung „kugelförmige“ und „eckige Partikel“, Bezugsgröße  $x_{c, min}$ , Auswertung volumenbezogen

	SPHT3					Symm <sub>3</sub>			
	Material	FK <sub>kugel</sub>	FK <sub>eckig</sub>	Differenz in %		Material	FK <sub>kugel</sub>	FK <sub>eckig</sub>	Differenz in %
1	Basalt	0,758	0,760	0,27 %		Basalt	0,861	0,862	0,15 %
2	Diabas	0,761	0,765	0,40 %		Diabas	0,863	0,865	0,15 %
3	Keratophyr	0,799	0,801	0,23 %		Keratophyr	0,875	0,876	0,10 %
4	Kalkstein	0,782	0,782	0,00 %		Kalkstein	0,870	0,871	0,10 %
5	Alpine Moräne	0,800	0,802	0,20 %		Alpine Moräne	0,875	0,877	0,15 %
6	gebr. Kies	0,795	0,799	0,35 %		gebr. Kies	0,873	0,874	0,07 %
7	Natursand	0,812	0,816	0,45 %		Natursand	0,883	0,886	0,30 %
8	Natursand	0,831	0,833	0,18 %		Natursand	0,888	0,889	0,09 %
9	Natursand	0,814	0,820	0,62 %		Natursand	0,879	0,883	0,32 %
10	Natursand	0,849	0,850	0,07 %		Natursand	0,895	0,895	0,02 %
11	Natursand	0,825	0,833	0,72 %		Natursand	0,885	0,888	0,28 %
12	Natursand	0,837	0,841	0,42 %		Natursand	0,890	0,891	0,15 %
	<b>b/l<sub>3</sub>-Verhältnis</b>								
	Material	FK <sub>kugel</sub>	FK <sub>eckig</sub>	Differenz in %		Material	FK <sub>kugel</sub>	FK <sub>eckig</sub>	Differenz in %
1	Basalt	0,672	0,641	3,17 %	7	Natursand	0,713	0,682	3,12 %
2	Diabas	0,676	0,645	3,10 %	8	Natursand	0,747	0,715	3,23 %
3	Keratophyr	0,716	0,678	3,80 %	9	Natursand	0,727	0,697	3,05 %
4	Kalkstein	0,680	0,648	3,20 %	10	Natursand	0,757	0,727	2,95 %
5	Alpine Moräne	0,718	0,687	3,18 %	11	Natursand	0,744	0,716	2,80 %
6	gebr. Kies	0,728	0,689	3,93 %	12	Natursand	0,769	0,732	3,78 %

**Tab. 6:** Die mittleren Messwerte der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität, Symmetrie und des Breiten-/Längenverhältnisses mit Änderung der Messeinstellung „kugelförmige Partikel“ oder „eckige Partikel“

der Einstellung „kugelförmige-“ und „eckige Partikel“ und der Differenz in Prozent dargestellt. Wie auch schon aus den Diagrammen zu erkennen, ist für die Sphärizität und die Symmetrie die Veränderung der Messeinstellung zu vernachlässigen, jedoch ist die „kennzeichnende Formkenngröße“ des Breiten-/Längenverhältnisses bei „eckiger“ Messeinstellung bis knapp 4 % geringer als bei „kugelförmiger“ Messeinstellung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Änderung der Einstellung „kugelförmige-“ oder „eckige Partikel“ keinen Einfluss auf die Kornverteilung der Partikel hat und auch kaum Auswirkungen auf die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität und der Symmetrie hat. Die Werte des Breiten-/Längenverhältnisses verändern sich deutlicher, da diese sich jedoch gleichermaßen verändern, wird die Bewertung der Brech- und Natursande dadurch nicht beeinflusst. Die weiteren Untersuchungen werden mit

der Einstellung „kugelförmige Partikel“ durchgeführt.

### 8.1.2 Messdichte der Partikel

Um die notwendige Einstellung der Messdichte (Solldichte) der Partikel festzulegen, wurden beispielhaft Messungen an zwei Natursanden mit Einstellung der Solldichte 1,0 % bzw. 0,5 %, durchgeführt. In Tabelle 7 sind die Messzeiten (in Minuten), die Formparameter je Messung (1. bis 4. Probe) und die daraus gemittelten „kennzeichnenden Formkenngrößen“ (FK) je Messung zusammengefasst.

Tabelle 7 zeigt, dass durch die Veränderung der Solldichte die Präzision der Messung sich im Wesentlichen nicht verändert, jedoch der Zeitaufwand der Messung sich fast verdoppelt. Daher werden die weiteren „Camsizer®“-Messungen mit der Solldichte 1,0 % durchgeführt.

Natursand (68)	Messdichte der Partikel: 1,0 %					Messdichte der Partikel: 0,5 %				
	1. Pr.	2. Pr.	3. Pr.	4.Pr.	FK	1. Pr.	2. Pr.	3. Pr.	4.Pr.	FK
Messzeit in Min.	11,55	11,35	11,42	11,49	<b>11,5</b>	22,39	21,58	22,1	22,27	<b>22,1</b>
SPHT <sub>3</sub>	0,840	0,841	0,843	0,842	<b>0,842</b>	0,846	0,847	0,848	0,847	<b>0,847</b>
Symm <sub>3</sub>	0,891	0,892	0,893	0,892	<b>0,892</b>	0,894	0,894	0,895	0,894	<b>0,894</b>
b/l <sub>3</sub>	0,731	0,730	0,731	0,731	<b>0,731</b>	0,733	0,733	0,733	0,733	<b>0,733</b>
SPHT <sub>0</sub>	0,820	0,820	0,821	0,820	<b>0,820</b>	0,822	0,822	0,822	0,822	<b>0,822</b>
Symm <sub>0</sub>	0,881	0,881	0,882	0,882	<b>0,882</b>	0,882	0,882	0,883	0,882	<b>0,882</b>
b/l <sub>0</sub>	0,709	0,708	0,708	0,708	<b>0,708</b>	0,709	0,709	0,709	0,709	<b>0,709</b>
Natursand (54)	Messdichte der Partikel: 1,0 %					Messdichte der Partikel: 0,5 %				
	1. Pr.	2. Pr.	3. Pr.	4.Pr.	FK	1. Pr.	2. Pr.	3. Pr.	4. Pr.	FK
Messzeit in Min.	8,16	8,5	8,9	8,6	<b>8,5</b>	15,8	15,28	-	-	<b>15,5</b>
SPHT <sub>3</sub>	0,833	0,833	0,838	0,831	<b>0,833</b>	0,838	0,838	-	-	<b>0,838</b>
Symm <sub>3</sub>	0,888	0,888	0,888	0,888	<b>0,888</b>	0,891	0,891	-	-	<b>0,891</b>
b/l <sub>3</sub>	0,717	0,716	0,716	0,716	<b>0,716</b>	0,718	0,719	-	-	<b>0,719</b>
SPHT <sub>0</sub>	0,814	0,814	0,813	0,812	<b>0,813</b>	0,815	0,815	-	-	<b>0,815</b>
Symm <sub>0</sub>	0,882	0,883	0,882	0,882	<b>0,882</b>	0,884	0,884	-	-	<b>0,884</b>
b/l <sub>0</sub>	0,678	0,678	0,677	0,677	<b>0,678</b>	0,678	0,678	-	-	<b>0,678</b>

Tab. 7: Einstellungsvarianten der Solldichte am „Camsizer®“ am Beispiel von zwei Natursanden, (Probe 68, NS und 54, NS), Bezugsgröße  $x_{c \min}$ , Auswertung volumen- und anzahlbezogen

### 8.1.3 Partikelgröße

Mit optischen Partikelmessgeräten werden für Partikelgrößen, je nach Definition (siehe Kapitel 3.3), unterschiedliche Breiten und Längen ermittelt. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Partikelgrößendefinitionen deutlich zu machen, wurde eine repräsentative Brechsandprobe ausgewählt und die Partikelgrößenverteilung an Hand von vier unterschiedlich definierten Partikelgrößen ( $x_{Ma \min}$ ,  $x_{c \min}$ ,  $x_{area}$  und  $x_{Fe \max}$ ) und der Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 dargestellt (siehe Bild 16). Am Beispiel des Brechsandes wird deutlich, dass die verschiedenen Partikelgrößen zu unterschiedlichen Verteilungskurven führen. Die Partikelgrößen  $x_{Ma \min}$  und  $x_{c \min}$  beschreiben die kleinsten Abmessungen eines Partikels und zeigen folglich auch die größten Übereinstimmungen mit der Siebung.

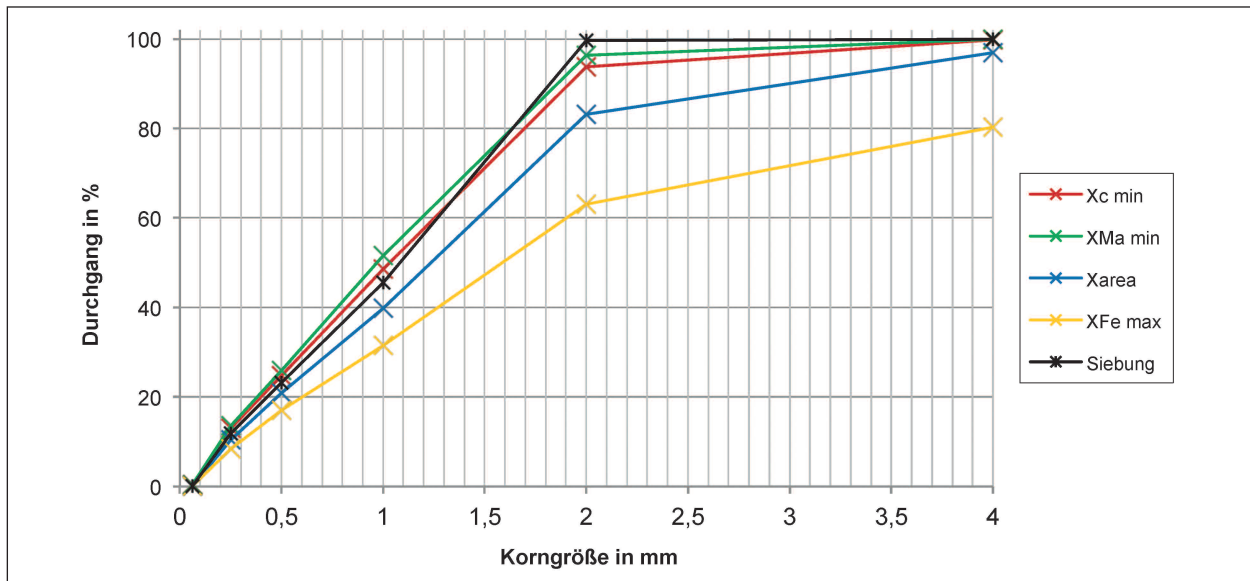
Beim Vergleich der beiden Partikelgrößen  $x_{c \min}$  und  $x_{Ma \min}$  an Hand der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärizität ergibt sich eine Korrelation von  $R^2 = 0,9957$  (siehe Bild 17). Aufgrund der guten Übereinstimmung und da von der Firma Retsch Technology für die Berechnung des Breiten-/Längenverhältnisses die Partikelgröße  $x_{c \min}$  verwendet wird, wurden die weiteren Auswertungen mit der Partikelgröße  $x_{c \min}$  durchgeführt.

## 8.2 Genauigkeit des Prüfverfahrens

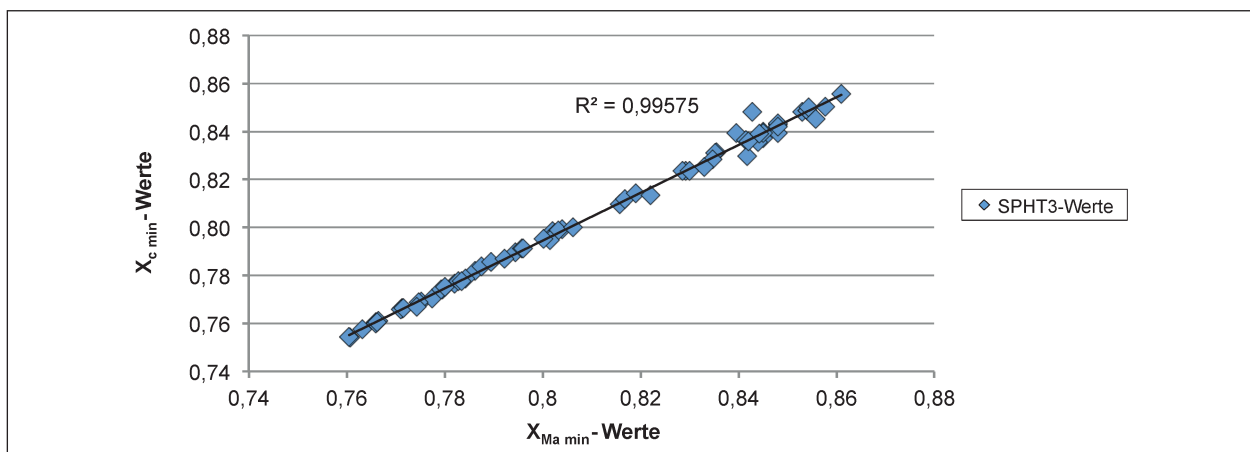
### 8.2.1 Richtigkeit des Prüfverfahrens

Zur Einschätzung der Richtigkeit des Prüfverfahrens und der verfahrensbedingten Messunsicherheiten wurden Referenzproben von drei Brechsanden (Diabas, gebrochener Kies, quarzitischer Sandstein) und eines Natursandes ausgewählt. Von jedem Sand wurden vier Teilproben mit dem „Camsizer®“ gemessen und die Mittelwerte der Partikelverteilung bestimmt. Die Messungen wurden volumenbezogen mit der Partikelgrößendefinition  $x_{c \min}$  ausgewertet. Um das Maß der Übereinstimmung zwischen der mittleren Partikelverteilung und dem Bezugswert (Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1) der jeweiligen Sande einschätzen zu können, wurden diese gegenübergestellt (siehe Bild 18). Die mittlere Partikelverteilung von Diabas und dem quarzitischem Sandstein, verglichen mit dem Bezugswert (Sieblinie), zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Der gebrochene Kies weicht bei Partikelgröße 1,0 mm von dem Bezugswert und der Natursand bei Partikelgröße 0,25 und 0,5 mm von dem Bezugswert ab.

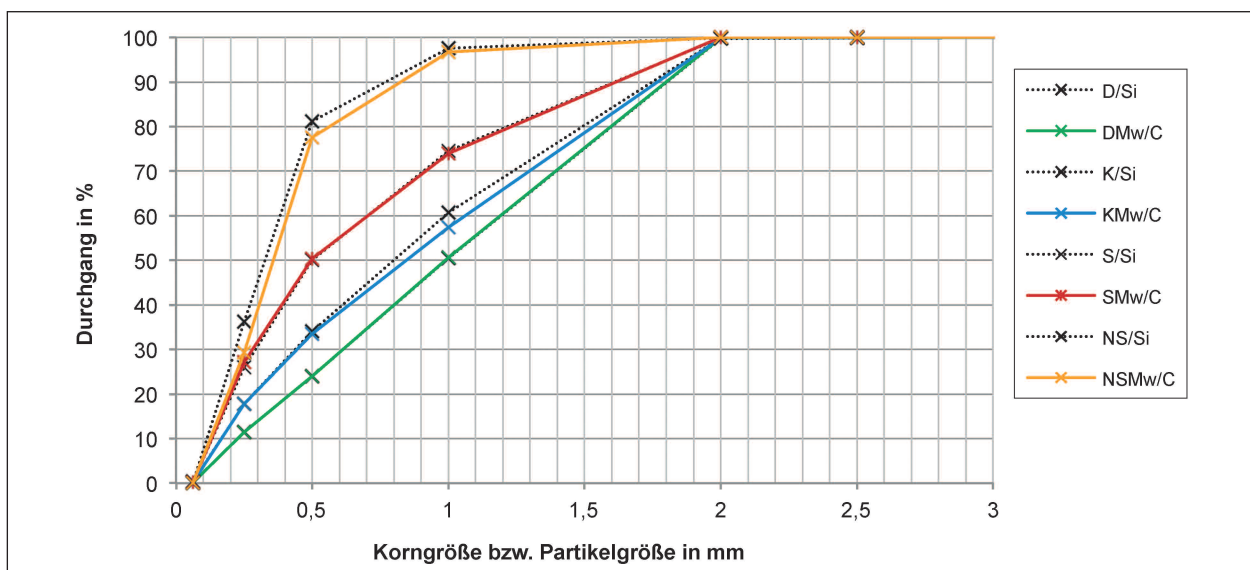
Zur Verdeutlichung der grafischen Darstellung sind in Tabelle 8 entsprechend der Kornklassen die Siebdurchgänge, die Durchgänge bei der mittleren



**Bild 16:** Vergleich der Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 und Messungen mit dem „Camsizer®“, ausgewertet volumenbezogen nach verschiedenen Definitionen für die Partikelgröße, am Beispiel einer Brechsandprobe



**Bild 17:** Vergleich der Partikelgrößen  $x_{c \min}$  und  $x_{Ma \min}$  ausgewertet nach der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärizität



**Bild 18:** Korngrößenverteilung (Bezugswert) und mittlere Partikelverteilung der Sande: Diabas (D) grün, gebr. Kies (K) blau, quarzistischer Sandstein (S) rot und der Natursand (NS) gelb, Auswertung volumenbezogen, Bezugsgröße  $x_{c \min}$

Korn- klasse	Diabas						gebrochener Kies					
	Durchgang in %		Auswertung „Camsizer®“				Durchgang in %		Auswertung „Camsizer®“			
	Siebung	Camsizer®	S <sub>R</sub>	Differenz	≤	d <sub>R</sub>	Siebung	Camsizer®	S <sub>R</sub>	Differenz	≤	d <sub>R</sub>
0,063/0,25	0,1	0,1	0,00	0,00	=	0,00	0,3	0,2	0,11	0,15	<	0,29
0,25/0,5	11,4	11,5	0,04	0,05	<	0,10	17,8	17,8	0,02	0,03	<	0,05
0,5/1,0	24,0	24,0	0,00	0,00	=	0,00	34,1	33,5	0,46	0,65	<	1,27
1,0/2,0	50,4	50,6	0,16	0,23	<	0,44	60,7	57,5	2,30	3,25	<	6,37
2,0/4,0	99,7	99,8	0,09	0,13	<	0,24	99,8	99,8	0,00	0,00	=	0,00
> 4,0	99,9	99,9	0,00	0,00	=	0,00	100,0	99,9	0,07	0,10	<	0,20
Korn- klasse	quarzitischer Sandstein						Natursand					
	Durchgang in %		Auswertung „Camsizer®“				Durchgang in %		Auswertung „Camsizer®“			
	Siebung	Camsizer®	S <sub>R</sub>	Differenz	≤	d <sub>R</sub>	Siebung	Camsizer®	S <sub>R</sub>	Differenz	≤	d <sub>R</sub>
0,063/0,25	0,3	0,2	0,07	0,10	<	0,20	0,1	0,0	0,07	0,10	<	0,20
0,25/0,5	26,0	27,1	0,80	1,13	<	2,20	36,2	29,3	4,88	6,90	<	13,51
0,5/1,0	50,0	50,4	0,27	0,38	<	0,73	81,1	77,6	2,47	3,50	<	6,86
1,0/2,0	74,5	73,9	0,41	0,58	<	1,13	97,5	96,8	0,53	0,75	<	1,47
2,0/4,0	99,9	100,0	0,04	0,05	<	0,10	99,9	100,0	0,07	0,10	<	0,20
> 4,0	99,9	100,0	0,07	0,10	<	0,20	100,0	100,0	0,00	0,00	=	0,00

Tab. 8: Bezugswerte (Siebung), mittlere Partikelverteilung („Camsizer®“) und die Auswertung der Messungen entsprechend der festgelegten Kornklassen

Partikelverteilung und die Auswertung der Prüfergebnisse in Anlehnung an die „Verträglichkeitsprüfung von Ergebnissen unter Vergleichsbedingungen“ angegeben (FGSV, 2000). Für die Auswertung wurden die Korngrößenverteilung und die mittlere Partikelgrößenverteilung als zwei einzelne Prüfergebnisse betrachtet und die Standardabweichung (s), die Spannweite (Differenz zwischen Siebung und Partikelmessung) und die kritische Spannweite von zwei einzelnen Prüfergebnissen mit der Vergleichsgrenze von  $d_R = 2,77 \cdot s_R$  ermittelt. Bei Betrachtung der vier Sandproben erreichen die Brechsande gute Übereinstimmungen. Der Natursand erlangt die höchsten Differenzen zwischen herkömmlicher Siebung und optischer Partikelmessung („Camsizer®“). Es wird aber in keinem Fall die kritische Spannweite ( $d_R$ ) überschritten.

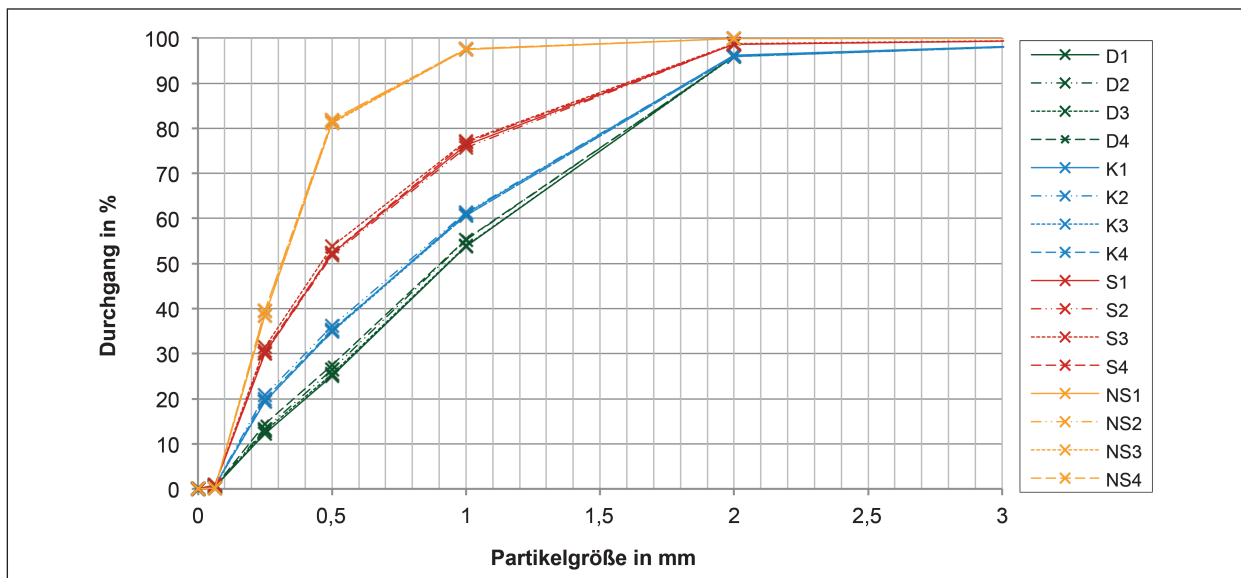
### 8.2.2 Präzision des Prüfverfahrens

Die Wiederholpräzision ist definiert als das Ausmaß der Übereinstimmung zwischen Ergebnissen unabhängiger Messungen. Zur Einschätzung der Präzision des Messverfahrens wurden die Partikelgrößenverteilungen der Teilproben der zuvor genannten

Sande in Bild 19 abgebildet. Zusätzlich wurden in Tabelle 9 die Messwerte der Teilproben und die statistische Auswertung der „Camsizer®“-Messungen aufgelistet. Für die statistische Auswertung wurden die Mittelwerte (MW), die Standardabweichung (s), die Spannweite ( $w_4$ ) und außerdem die kritische Spannweite ( $d_r = 3,63 \cdot s_r$  – unter Wiederholbedingungen) ermittelt. Die kritische Spannweite wird ermittelt, um zu prüfen, ob die Messwerte einer Messreihe stärker voneinander abweichen, als dies im Rahmen der Verfahrenspräzision unter den jeweiligen Prüfbedingungen zu erwarten ist (FGSV, 2000).

Die Überprüfungen der vier Sande unter Wiederholbedingungen ergaben gute Übereinstimmungen. Der Natursand und der gebrochene Kies zeigen sehr gute übereinstimmende Partikelverteilungen. Die kritische Spannweite ist in allen Fällen kleiner als die Spannweite der Messergebnisse oder identisch mit diesen. Demnach lassen sich mit dem optischen Messgerät „Camsizer®“ die Messungen gut wiederholen.

Des Weiteren wurden für die Teilproben der vier Sande die Formparameter der Sphärizität (SPHT<sub>3</sub>) bestimmt (siehe Bild 20). Die Formparameter der Sphärizität zeigen eine gute Übereinstimmung. Für



**Bild 19:** Partikelverteilung von vier Sandproben (jeweils Probe 1 – 4) der Sande: Diabas (D) grün, geb. Kies (K) blau, quarzistischer Sandstein (S) rot und Natursand (NS) gelb, Auswertung volumenbezogen, Bezugsgröße  $x_{c \min}$

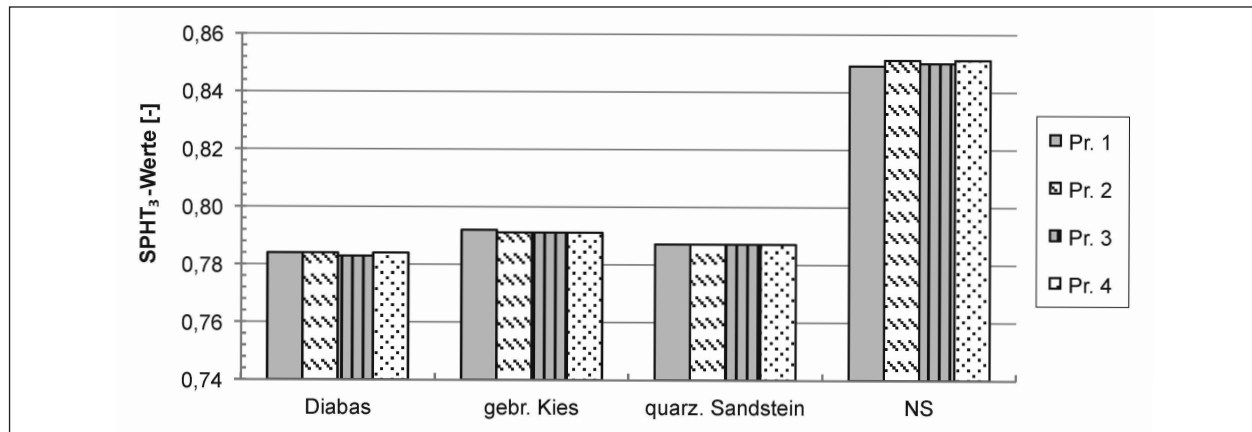
Korn- klasse	Diabas										Kies geb.									
	Durchgang in %					Auswertung „Camsizer®“					Durchgang in %					Auswertung „Camsizer®“				
	Camsizer®-Messproben					Statistische Kenngrößen					Camsizer®-Messproben					Statistische Kenngrößen				
	1	2	3	4	MW <sub>4</sub>	S	W <sub>4</sub>	≤	d <sub>r</sub>	1	2	3	4	MW <sub>4</sub>	S	W <sub>4</sub>	≤	d <sub>r</sub>		
0,063/0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,00	0,00	=	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	<b>0,2</b>	0,06	0,10	<	0,2		
0,25/0,5	11,7	11,3	11,5	11,3	<b>11,5</b>	0,19	0,40	<	0,7	17,9	17,5	17,2	18,5	<b>17,8</b>	0,56	1,30	<	2,0		
0,5/1,0	24,7	23,9	23,9	23,5	<b>24,0</b>	0,50	1,20	<	1,8	33,6	33,1	32,7	34,4	<b>33,5</b>	0,73	1,70	<	2,7		
1,0/2,0	51,1	50,6	50,7	50,1	<b>50,6</b>	0,41	1,00	<	1,5	57,4	56,9	57,2	58,3	<b>57,5</b>	0,60	1,40	<	2,2		
2,0/4,0	99,8	99,8	99,9	99,8	<b>99,8</b>	0,05	0,10	<	0,2	99,8	99,8	99,8	99,8	<b>99,8</b>	0,00	0,00	=	0,0		
> 4,0	99,9	99,9	99,9	99,9	<b>99,9</b>	0,00	0,00	=	0,0	99,9	99,9	99,9	99,9	<b>99,9</b>	0,00	0,00	=	0,0		
Korn- klasse	quarzistischer Sandstein										Natursand									
	Durchgang in %					Auswertung „Camsizer®“					Durchgang in %					Auswertung „Camsizer®“				
	Camsizer®-Messproben					Statistische Kenngrößen					Camsizer®-Messproben					Statistische Kenngrößen				
	1	2	3	4	MW <sub>4</sub>	S	W <sub>4</sub>	≤	d <sub>r</sub>	1	2	3	4	MW <sub>4</sub>	S	W <sub>4</sub>	≤	d <sub>r</sub>		
0,063/0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	<b>0,2</b>	0,00	0,00	=	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	0,00	0,00	=	0,0		
0,25/0,5	25,7	27,9	27,8	27,1	<b>27,1</b>	1,01	2,20	<	3,7	29,3	29,3	29,9	28,7	<b>29,3</b>	0,49	1,20	<	1,8		
0,5/1,0	48,7	51,2	51,3	50,3	<b>50,4</b>	1,20	2,60	<	4,4	77,6	77,2	78,2	77,4	<b>77,6</b>	0,43	1,00	<	1,6		
1,0/2,0	73,0	74,3	74,7	73,7	<b>73,9</b>	0,74	1,70	<	2,7	96,8	96,7	96,7	96,8	<b>96,8</b>	0,06	0,10	<	0,2		
2,0/4,0	100,0	99,9	100,0	99,9	<b>100,0</b>	0,06	0,10	<	0,2	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	0,00	0,00	=	0,0		
> 4,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	0,00	0,00	=	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	0,00	0,00	=	0,0		

**Tab. 9:** Tabellarische Auflistung der Messergebnisse der „Camsizer®“-Messungen und statistische Auswertung der „Camsizer®“-Messungen der vier Teilproben der vier Sande

die Auswertung wurden die Formparameter zur „kennzeichnenden Formkenngröße“ (FK) zusammengefasst und die Standardabweichung (s) und die Spannweite ( $w_4$ ) der Messwerte als Maß für die

Streuung angegeben (siehe Tabelle 10). Der quarzistische Sandstein hat übereinstimmende Formparameter und die Formparameter der übrigen Sande weichen höchstens 0,2 % von einander ab. Eine





**Bild 20:** Darstellung der Formparameter der Sphärizität (SPHT<sub>3</sub>) von vier Teilproben je Sand (drei Brech- und eine Natursandprobe), Bezugsgröße  $x_{c \min}$ , Auswertung volumenbezogen

	$E_{CS}$	Formparameter	TPr. 1	TPr. 2	TPr. 3	TPr. 4	FK	s	$w_4$
Diabas	43	SPHT <sub>3</sub>	0,784	0,784	0,783	0,784	0,784	0,001	0,001
		Symm <sub>3</sub>	0,871	0,871	0,871	0,870	0,871	0,001	0,001
		b/l <sub>3</sub>	0,702	0,702	0,702	0,701	0,702	0,001	0,001
Gebr. Kies	38	SPHT <sub>3</sub>	0,792	0,791	0,791	0,791	0,791	0,001	0,001
		Symm <sub>3</sub>	0,873	0,873	0,873	0,873	0,873	0,000	0,000
		b/l <sub>3</sub>	0,705	0,706	0,705	0,706	0,706	0,001	0,001
Quarz. Sandstein	33	SPHT <sub>3</sub>	0,787	0,787	0,787	0,787	0,787	0,000	0,000
		Symm <sub>3</sub>	0,872	0,872	0,872	0,871	0,872	0,001	0,001
		b/l <sub>3</sub>	0,719	0,720	0,721	0,720	0,720	0,001	0,002
Natursand	23	SPHT <sub>3</sub>	0,849	0,851	0,850	0,851	0,850	0,001	0,002
		Symm <sub>3</sub>	0,895	0,895	0,895	0,895	0,895	0,000	0,000
		b/l <sub>3</sub>	0,777	0,777	0,778	0,779	0,778	0,001	0,002

**Tab. 10:** Einzelwerte der Formparameter der SPHT<sub>3</sub>, der Symm<sub>3</sub> und des b/l<sub>3</sub>-Verhältnisse, „kennzeichnende Formkenngrößen“, Standardabweichung und Spannweiten der Einzelmessungen

gleich gute Übereinstimmung zeigen auch die Formparameter der Symmetrie und des Breiten-/Längenverhältnisses. Die Spannweiten der Formparameter liegen im Promillebereich von 0 bis 0,002. Hinsichtlich der Diagramme und der Tabelle 10 wird deutlich, dass die ermittelten Formkennwerte sehr geringe Abweichungen aufweisen, sodass eine gute Wiederholbarkeit der Messungen möglich ist.

### 8.2.3 Einschätzung der Genauigkeit

Die Genauigkeit steht als Oberbegriff für die Richtigkeit und Präzision. Daher wurde zur Einschätzung der Richtigkeit des Verfahrens von vier Sanden die Korngrößenverteilung als Bezugswert und die mittlere Partikelverteilung der Referenzsandproben bestimmt. Es konnte für zwei Brechsande eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt wer-

den. Aber auch die beiden anderen Proben liegen im Rahmen der zulässigen Grenzen. Zur Einschätzung der Präzision wurden die Einzelwerte je Messreihe unter Wiederholbedingungen ausgewertet. Bei allen Sandproben ist eine sehr gute bis gute Übereinstimmung festzustellen. Die Auswertung der Messwerte im Rahmen der Verträglichkeitsprüfung unter Wiederholbedingungen zeigte gute Zusammenhänge. Die Genauigkeit des Prüfverfahrens ist im Hinblick auf die vier Sandproben als gut einzuschätzen.

## 8.3 Zusammenfassung der Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen in Bezug auf die Messeinstellungen zeigen, dass die Einstellung „kugelförmig-

ge-“ oder „eckige Partikel“ kaum Einfluss auf die Kornverteilung der Partikel hat und auch die Auswirkungen auf die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität und der Symmetrie sehr gering sind. Die Werte des Breiten-/Längenverhältnisses unterscheiden sich jedoch deutlicher, aber unabhängig davon, ob es sich um Brech- oder Natursand handelt. Die Messungen der Hauptuntersuchungen werden künftig mit der Einstellung „kugelförmige“ Partikel durchgeführt. Weiter lässt sich festhalten, dass eine Messdichte von 1,0 % für die vorgesehenen Messungen als ausreichend bezeichnet werden kann. Da sich die Partikelgröße  $x_{C \min}$ , gut für die Darstellung der Sieblinie eignet und auch für die Berechnung des Breiten-/Längenverhältnisses verwendet wird, werden die übrigen Auswertungen mit der genannten Partikelgröße durchgeführt.

Die Genauigkeit als Oberbegriff wird differenziert durch die Begriffe Richtigkeit und Präzision. Zur Einschätzung der Richtigkeit des Messverfahrens wurden die mittlere Partikelverteilung der „Camsizer®“-Messung und die konventionellen Sieblinie nach DIN EN 933-1 als Bezugsgröße gewählt. Es konnte an Hand der vier Sandproben eine zufriedenstellende Übereinstimmung festgestellt werden. Zur Einschätzung der Präzision des Messverfahrens wurden die Übereinstimmung der Partikelverteilung und die Formparameter der Sphärizität je Teilprobe betrachtet. Die festgestellte Übereinstimmung war groß. Daher ist die Genauigkeit des Prüfverfahrens positiv einzuschätzen. Die übrigen Sande in der Hauptuntersuchung werden entsprechend den Vorgaben aus den Voruntersuchungen geprüft.

## 9 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen

### 9.1 Konventionelle Prüfmethode

#### 9.1.1 Fließkoeffizient

Im Rahmen von Untersuchungen (KUKIES 2004) wurde der Fließkoeffizient ( $E_{CS}$ ) ermittelt. Für das jetzige Projekt wurde erneut der Fließkoeffizient an den vorhandenen Brech- und Natursandproben bestimmt. Ein Vergleich der beiden Messungen ist im Bild 21 dargestellt. Die Fließkoeffizienten der Natursande, die 2012 ermittelt wurden, liegen tendenziell höher als die von 2004. Die Messwerte der Brechsande streuen breiter. Da die Untersuchungen von unterschiedlichen Laboranten, an neu vorbereiteten Proben und mit einer anderen Prüfeinrichtung durchgeführt wurden, ist laut DIN EN 933-6 (Anhang B) eine Vergleichspräzision von  $R = 2,9$  zu erwarten.

Die Häufigkeitsverteilung der Fließkoeffizienten der Brech- und Natursande und die Klassen der Kantigkeit nach DIN EN 13 043 zeigen Bild 22. Der Wertebereich der Natursande liegt zwischen  $E_{CS}$  23 und 32, mit einer Ausnahme, bei einem Natursand wurde ein Fließkoeffizient von  $E_{CS}$  36 ermittelt. Die Brechsandproben haben einen Ausflusswert zwischen  $E_{CS}$  32 und 44. Es gibt einen Überschneidungsbereich in den Kategorien  $\geq 30$  und  $\geq 35$ , sodass nicht eindeutig auf die Gewinnungsart Brech- oder Natursand geschlossen werden kann.

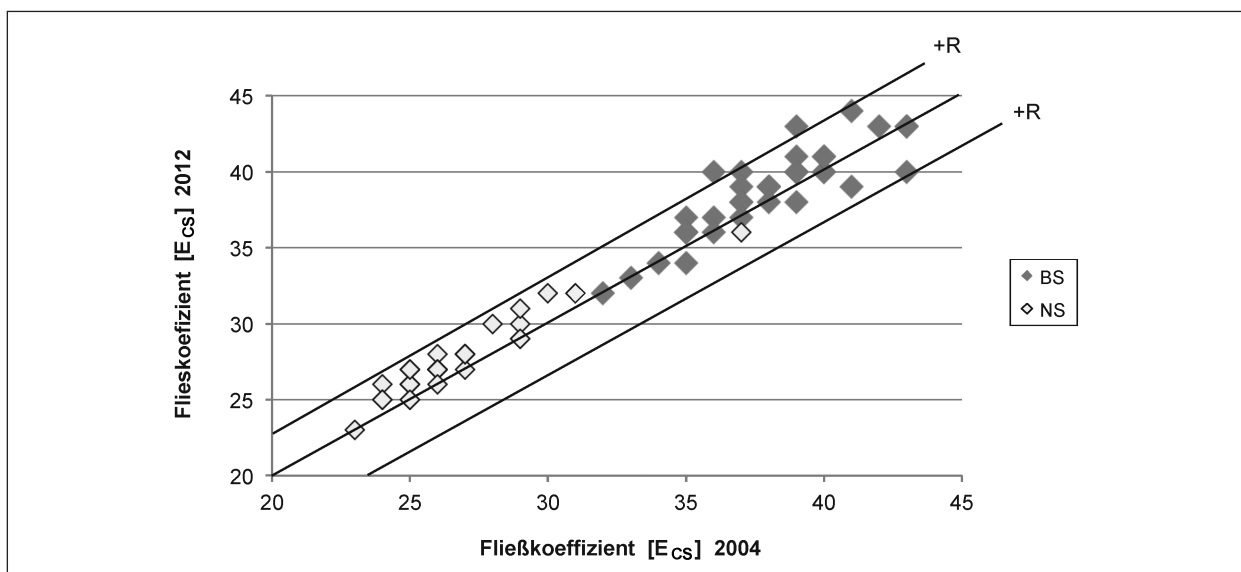


Bild 21: Vergleich der Fließkoeffizienten ( $E_{CS}$ ) der Untersuchungen von 2004 und 2012 und Vergleichsgrenze R

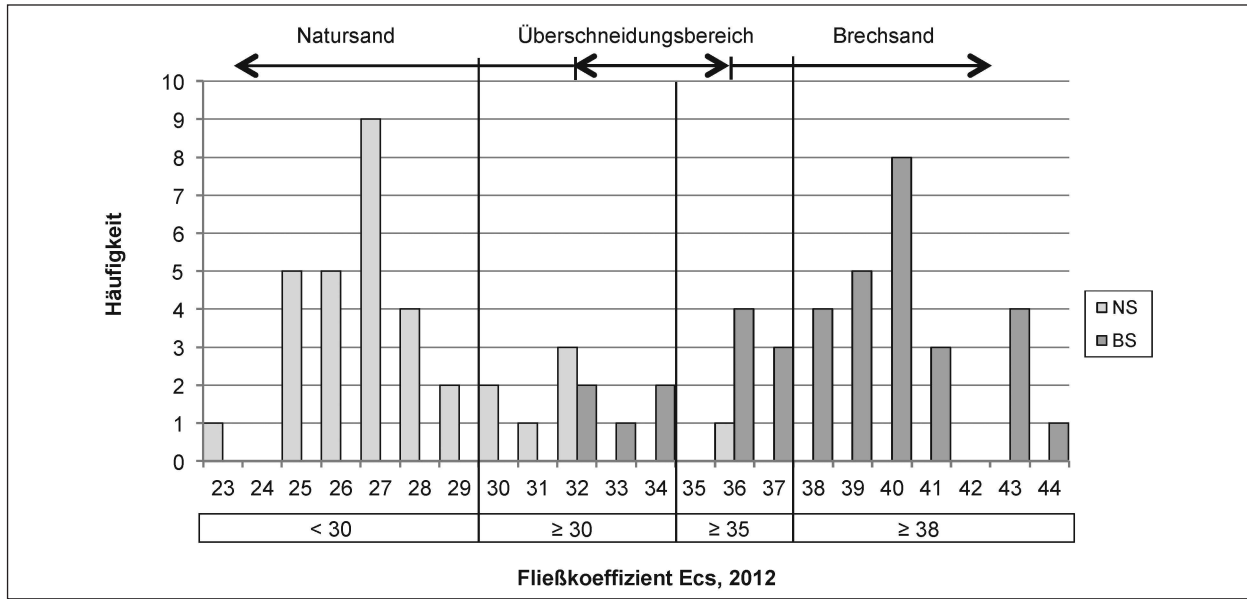


Bild 22: Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Fließkoeffizienten ( $E_{CS}$ ) 2012

### 9.1.2 Korngrößenverteilung

Von allen feinen Gesteinskörnungen wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 bestimmt. In Tabelle 11 sind die minimalen und maximalen Siebdurchgänge der Brech- und Natursandproben angegeben. Da die Brech- und Natursande eine große Bandbreite abdecken, wirkt sich dies auch auf die Spannweite der Siebdurchgänge aus. Ab dem Siebdurchgang 0,5 mm sind die Natursande zum Teil deutlich feiner als die Brechsande.

Siebdurchgänge bei	Natursand in M.-%	Brechsand in M.-%
0,25	6,0-36,2	9,3-31,7
0,5	29,5-81,1	23,2-52,0
1,0	58,6-97,5	45,5-82,5
2,0	99,6-100	96,6-100

Tab. 11: Angabe der minimalen und maximalen Siebdurchgänge nach DIN EN 933-1, Natur- und Brechsand

## 9.2 Messungen mit dem optischen Partikelmessgerät

### 9.2.1 Partikelgrößenverteilung

Mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer<sup>®</sup>“ wurde die Partikelgrößenverteilung der Brech- und Natursandproben gemessen. Da jeweils vier Teilproben gemessen wurden, sind die Mittelwerte der minimalen und maximalen Partikelgrößenverteilung entsprechend der Siebdurchgänge in Tabelle 12 angegeben. Die Spannweiten der Partikelgrößenverteilung weisen Unterschiede zur Korngrößenverteilung der Sande auf. Da bei Partikeln gleicher Größe und Form größte und kleinste Werte gemessen werden können, die durch die zufällige Projektion während der Messung begründet sind (siehe Kapitel 3.3.1 und 5.2).

Siebdurchgänge bei	Natursand in V.-%	Brechsand in V.-%
0,25	6,3-38,1	9,1-36,8
0,5	29,9-77,6	23,2-54,5
1,0	57,3-96,8	46,8-81,9
2,0	96,7-100	92,2-100

Tab. 12: Angabe der minimalen und maximalen Partikelgrößenverteilung der Natur- und Brechsande

Beispielhaft wurden acht Natursandproben für den Vergleich der Korngrößenverteilung (konventionel-

les Prüfverfahren) und der Partikelgrößenverteilung (optisches Messverfahren) ausgewählt (siehe Bild 23). Ebenso wurden acht Brechsandproben (Basalt, Grauwacke, Diabas, Keratophyr, Kalkstein, Gabbro, gebrochene Alpin Moräne und gebrochener Kies) dargestellt (siehe Bild 24). Die Natursande und die Brechsande zeigen breit gestreute Verteilungskurven. Der Vergleich der Korngrößenverteilung mit der Partikelgrößenverteilung zeigt nicht immer eine direkt Übereinstimmung, der Verlauf der Summenkurven ist tendenziell jedoch gleich. Von Seiten des Herstellers gibt es die Möglichkeit, die „Camsizer<sup>®</sup>-Messungen an die herkömmliche Sie-

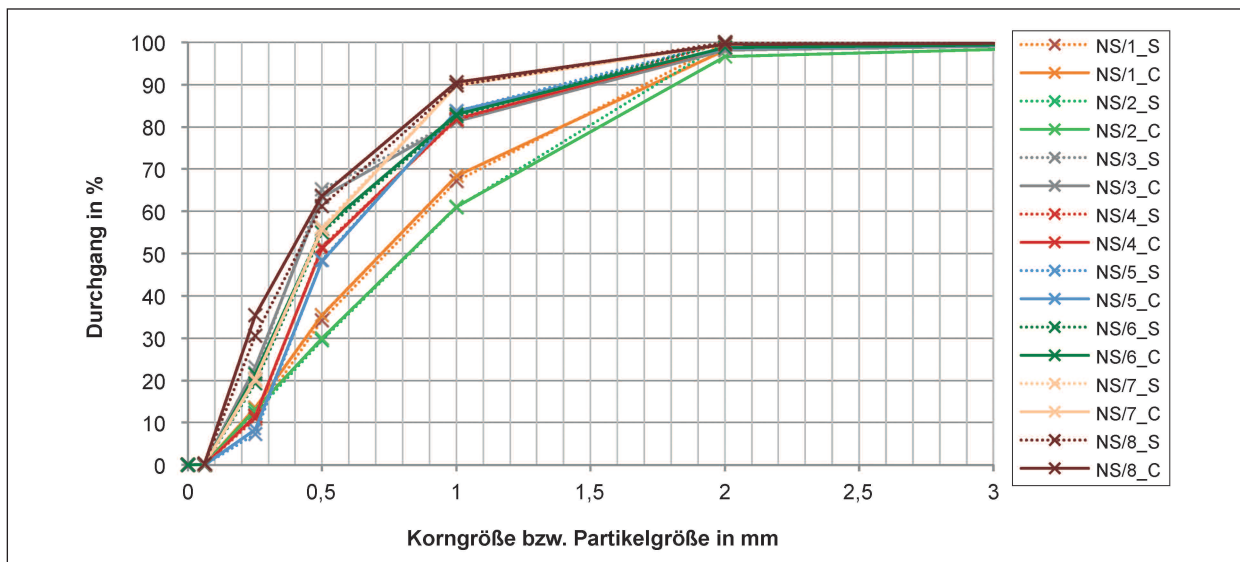


Bild 23: Korngrößenverteilung (S) nach DIN EN 933-1 und Partikelverteilung mit dem „Camsizer®“ (C) von acht Natursandproben

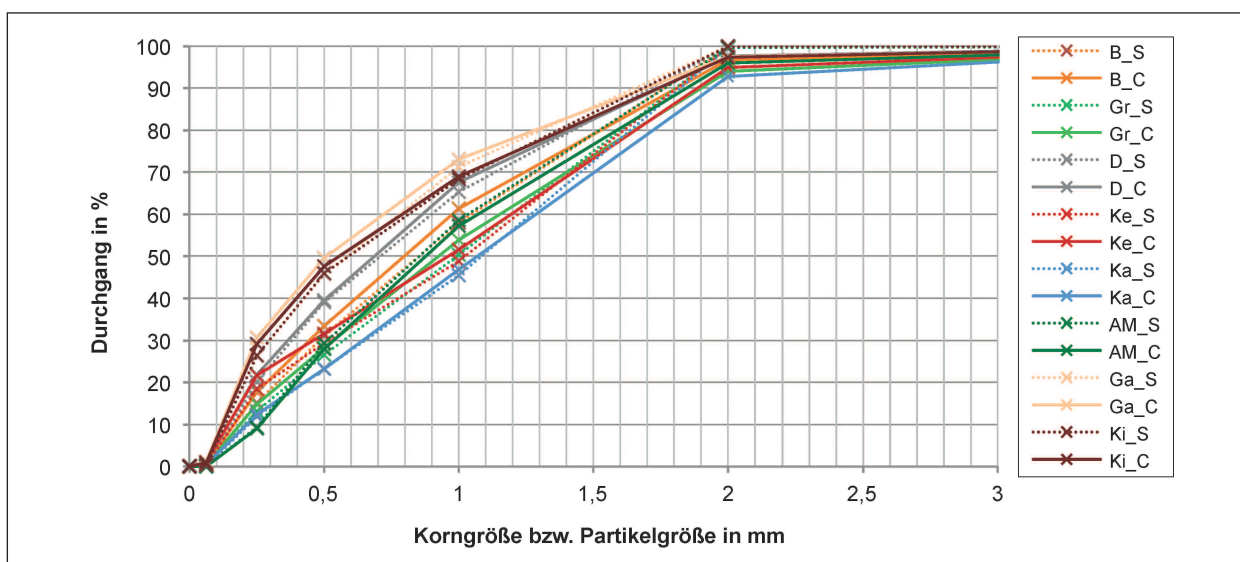


Bild 24: Korngrößenverteilung (S) nach DIN EN 933-1 und Partikelverteilung mit dem „Camsizer®“ (C) von acht Brechsandproben

zung anzupassen. Bei diesen Untersuchungen wurde darauf verzichtet, da die Anpassung nicht zur Unterscheidung zwischen Brech- und Natursand beitragen kann.

### 9.2.2 Ergebnisse der Einzelbildauswertung

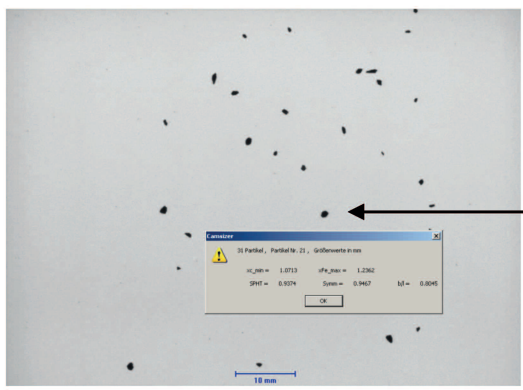
Die Schattenprojektionen der Partikel werden während der Messung als Bilder gespeichert und können einzeln analysiert werden. Je Partikel können ausgewählte Größen- und Formparameter angezeigt werden. Am Beispiel eines Brechsandes (Keratophyr) sind nachfolgend die Schattenprojektionen der Basic- und Zoomkamera abgebildet (siehe Tabelle 13).

Die Einzelbildauswertung ist sehr zeitaufwendig und kann im Einzelfall ergänzend verwendet werden, um die Ergebnisse der Formkenngrößenbestimmung besser zu interpretieren.

### 9.2.3 Ergebnisse der Formkenngrößenbestimmung

Zeitgleich zur Partikelgröße werden Formparameter aus den einzelnen Partikelprojektionen mit dem optischen Partikelmessgerät bestimmt. Für jede Sandprobe werden volumen- und anzahlabhängig die Formparameter der Sphärizität (SPHT), der Symmetrie (Symm) und das Breiten-/Längenverhältnis (b/l) angegeben. Zur Verdeutlichung der Auswertung

Keratophyr, E<sub>CS</sub> 40, 31 Partikel aufgenommen mit der Basic-Kamera



**Camsizer**

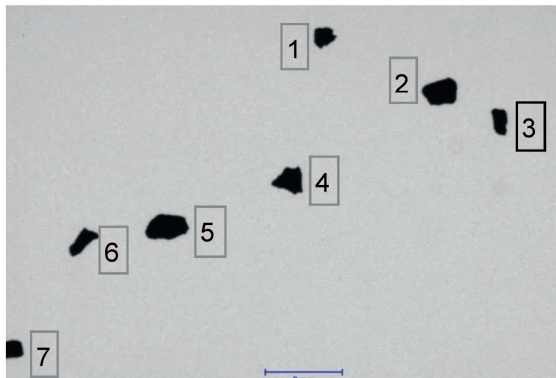
31 Partikel, Partikel Nr. 21, Größenwerte in mm

xc\_min = 1.0713      xFe\_max = 1.2362

SPHT = 0.9374      Symm = 0.9467      b/l = 0.8045

OK

Keratophyr, E<sub>CS</sub> 40, 7 Partikel aufgenommen mit der Zoom-Kamera



	Partikel, Größenangabe in mm					
	1	2	3	4	5	6
X <sub>c</sub> min	0,523	0,682	0,378	0,684	0,659	0,393
X <sub>Fe</sub> max	0,583	0,919	0,734	0,837	1,136	0,869
SPHT	0,812	0,871	0,739	0,710	0,810	0,638
Symm	0,882	0,897	0,864	0,814	0,925	0,821
b/l	0,871	0,728	0,500	0,799	0,569	0,442

der 7. Partikel wird mit der Zoom-Kamera nicht mehr gemessen, da er den Rand berührt und so nicht mehr verlässlich quantifiziert werden kann

Tab. 13 : Schattenprojektionen der Einzelauswertung der Basic- und der Zoomkamera, Angaben zu Partikelgröße und Formparametern

Natursand, E <sub>CS</sub> 27									
Formparameter	1. Pr	2. Pr	3. Pr	4. Pr	FK	s	w <sub>4</sub>	<	d <sub>r</sub>
SPHT <sub>3</sub>	0,844	0,844	0,842	0,841	0,843	0,002	0,003	<	0,005
Symm <sub>3</sub>	0,894	0,894	0,892	0,892	0,893	0,001	0,002	<	0,004
b/l <sub>3</sub>	0,763	0,763	0,763	0,762	0,763	0,001	0,001	<	0,002
SPHT <sub>0</sub>	0,811	0,812	0,811	0,810	0,811	0,001	0,002	<	0,003
Symm <sub>0</sub>	0,880	0,880	0,880	0,879	0,880	0,001	0,001	<	0,002
b/l <sub>0</sub>	0,772	0,772	0,773	0,773	0,773	0,001	0,001	<	0,002
Brechsand, E <sub>CS</sub> 40									
Formparameter	1. Pr	2. Pr	3. Pr	4. Pr	FK	s	w <sub>4</sub>	<	d <sub>r</sub>
SPHT <sub>3</sub>	0,776	0,774	0,776	0,775	0,775	0,001	0,002	<	0,003
Symm <sub>3</sub>	0,868	0,867	0,868	0,868	0,868	0,000	0,001	<	0,002
b/l <sub>3</sub>	0,693	0,695	0,691	0,691	0,693	0,002	0,004	<	0,007
SPHT <sub>0</sub>	0,777	0,778	0,777	0,777	0,777	0,001	0,001	<	0,002
Symm <sub>0</sub>	0,868	0,868	0,869	0,868	0,868	0,001	0,001	<	0,002
b/l <sub>0</sub>	0,732	0,731	0,731	0,735	0,732	0,002	0,004	<	0,007

Tab. 14: Beispiel Auswertung von einem Natursand (Fließkoeffizient E<sub>CS</sub> 27) und einem Brechsand (Diabas) (Fließkoeffizient E<sub>CS</sub> 40) Bezugsgröße x<sub>c</sub> min

(siehe Kapitel 5.4) sind beispielhaft in Tabelle 14 die Ergebnisse einer Natur- und einer Brechsandprobe mit der Bezugsgröße  $x_{c \min}$ , volumenabhängig (Index 3) und anzahlabhängig (Index 0) aufgezeigt.

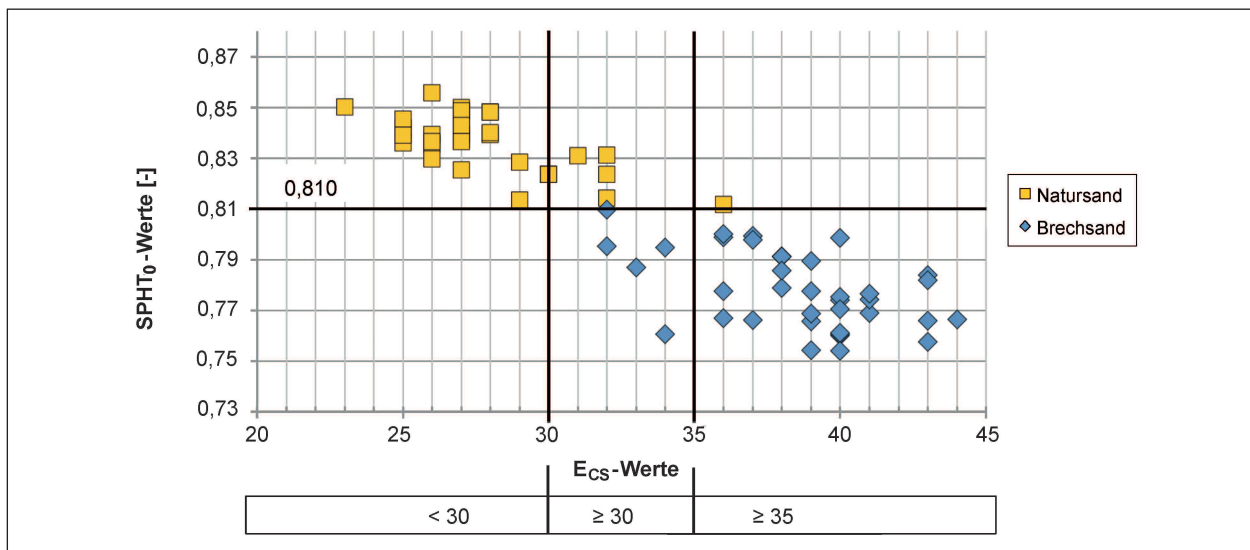
Alle weiteren Natur- und Brechsandproben wurden entsprechend ausgewertet und sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

### 9.2.3.1 Formkenngröße der Sphärizität

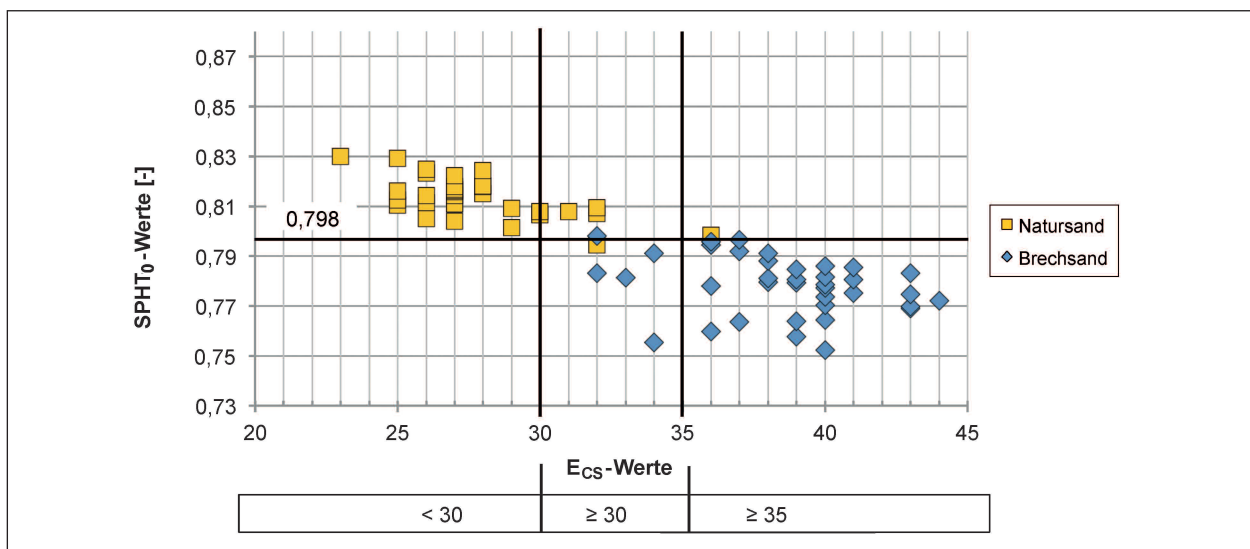
a) Ergebnisse aus volumenbezogenen und anzahlbezogenen Messungen

Die Partikelmessungen der Natur- und Brechsandproben wurden als „kennzeichnende Formkenngrö-

ßen“ der Sphärizität, volumenabhängig und anzahlabhängig ausgewertet und im Zusammenhang mit den zugehörigen Fließkoeffizienten dargestellt (siehe Bild 25 und Bild 26). In der volumenabhängigen Auswertung liegen die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ (FK<sub>SPHT3</sub>) der Natursande (gelb) zwischen 0,856 und 0,812. Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Brechsande (blau) liegen zwischen 0,810 und 0,754. Es ist bei der volumenabhängigen Auswertung möglich, eine „knappe“ Trennungslinie (SPHT-Wert: 0,810) zwischen Natursand und Brechsand zu ziehen. Auch ist eine Tendenz zwischen Fließkoeffizienten ( $E_{CS}$ -Wert) und Werten der Sphärizität zu erkennen. Es wird aber deutlich, dass ein hoher Fließkoeffizient nicht



**Bild 25:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ (FK<sub>SPHT3</sub>) der Sphärizität von 69 Brech- und Natursandproben und den dazugehörigen  $E_{CS}$ -Werten, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



**Bild 26:** Anzahlbezogene Auswertung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ (FK<sub>SPHT0</sub>) der Sphärizität von 69 Brech- und Natursandproben, Bezugsgröße  $x_{c \min}$

zwangsläufig zu einem niedrigen Wert der Sphärität führt.

Durch die anzahlbezogene Auswertung der Partikelmessung verändert sich die Spannweite des Betrachtungsraums. Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität ( $FK_{SPHT0}$ ) der Natursande (gelb) liegen zwischen 0,830 und 0,795. Die  $FK_{SPHT0}$  der Brechsande (blau) liegen zwischen 0,798 und 0,752. Vor allem beim Natursand scheinen die feinen Staubpartikel dafür zu sorgen, dass die Formkenngrößen der Sphärität sich verringern und dadurch die Sandpartikel unrunder erscheinen. Auch ist der Unterschied zwischen Natursand und Brechsand nicht mehr eindeutige zu erkennen.

b) Auswertung zur Präzision

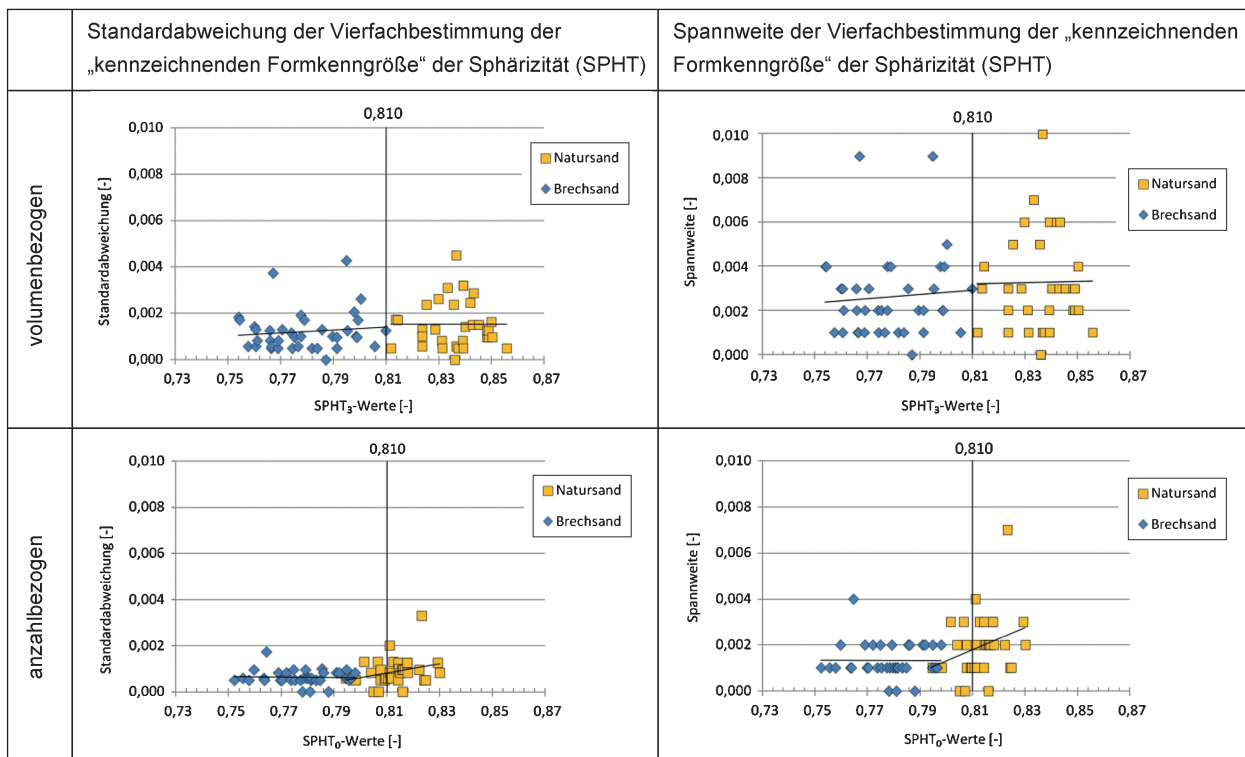
Als Maß für die Streuung der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärität sind die Spannweiten und die Standardabweichungen der Ergebnisse volumenabhängig und anzahlabhängig ausgewertet in Bild 27 dargestellt. Die volumenbezogene Standardabweichung der Messergebnisse der Sphärität liegt zwischen 0 und 0,0045 (0,45 %). Im Durchschnitt ist die Standardabweichung der Sphärität ca. 0,002 (0,2 %). Die anzahlbezogene Standardabweichung liegt bis auf

eine Ausnahme zwischen 0 und 0,002. Die anzahlbezogenen Messwerte streuen nicht so stark wie die volumenbezogenen Messwerte. Bei Betrachtung der volumenbezogenen Auswertung fällt zunächst die Differenz der Einzelergebnisse eines Natursands mit 0,010 und von zwei Brechsandproben mit 0,009 auf. Die statistische Sicherheit ( $P = 95 \%$ ) ist gewährleistet, wenn die Spannweite  $w_4$  kleiner ist als die kritische Spannweite  $d_r = 3,63 \cdot s$  ( $w_4 < 3,63 \cdot s$ ) (siehe FGSV, 2000). Für die hier geprüften Sandproben trifft dies in jedem Fall zu. Durchschnittlich beträgt die Differenz der Formparameter der Sphärität beim Brechsand, als auch beim Natursand, 0,003 (0,3 %). Die Spannweite der anzahlbezogenen Auswertung liegt bis auf eine Ausnahme zwischen 0 und 0,004 (0,4 %).

Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität können als präzise eingestuft werden. Die maximale Differenz der vier Einzelergebnisse liegt bei 0,010 SPHT.

c) Bewertung der Ergebnisse

Mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ sollte geprüft werden, inwieweit es möglich ist, charakteristische Kornformmerkmale von feinen Ge-



**Bild 27:** Darstellung der Spannweite und der Standardabweichung, volumen- und anzahlbezogene Auswertung der Vierfachbestimmung der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärität ( $SPHT_3$  und  $SPHT_0$ )

steinskörnungen zu bestimmen und ob eine Unterscheidung von Brech- und Natursand möglich ist. Zunächst wurde die Auswertung der volumenbezogenen und der anzahlbezogenen Messungen betrachtet. Hinsichtlich der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität werden Unterschiede zwischen den verschiedenen Auswertungsvarianten deutlich. Durch die volumenabhängige Auswertung werden feine Staubpartikel weniger stark und größere Partikel stärker bewertet (siehe Kapitel 5.4). Dies führt dazu, dass die charakteristischen Eigenschaften der Sandproben differenzierter dargestellt werden können. Bei der anzahlbezogenen Auswertung ist kein eindeutiger Unterschied zwischen den „kennzeichnenden Formkenngrößen“ von Natursand und Brechsand zu erkennen ist. Daher erscheint es zielführender zu sein, alle weiteren Partikelmessungen „volumenbezogen“ auszuwerten.

Das Messprinzip „Bestimmung des Fließkoeffizienten“ geht davon aus, dass runde Körner schneller durch den Trichter fließen, als eckige Körner. Für das optische Partikelmessgerät „Camsizer®“ gilt, je runder ein Partikel ist, desto höherer ist sein Messwert der Sphärizität. Daher wird überprüft, ob eine Korrelation zwischen den Messwerten dargestellt werden kann (siehe Bild 28). In der Gegenüberstellung der Messwerte ist eine Tendenz zu erkennen. Es kann aber nicht verallgemeinert werden, dass ein niedriger Fließkoeffizient ( $E_{CS}$ -Wert) einen hohen Wert für die Sphärizität ergibt. Ein deutlicher Zusammenhang (vor allem bei den Brechsanden) zwischen Fließkoeffizient und Sphärizität ist nicht zu erkennen.

Durch die volumenabhängige Auswertung ist es möglich, eine „knappe“ Trennung zwischen Natursand und Brechsand darzustellen. Zur eindeutigen Unterscheidung sollten die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ (Messergebnisse) zwischen Natursand und Brechsand mindestens den Abstand der Messunsicherheit betragen. Die Messunsicherheit wird mit einem Erweiterungsfaktor von  $k = 3$  berechnet, sodass dies einem Vertrauensniveau von ca. 99 % entspricht. Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sande wurden daher dreimal um die Standardabweichung erweitert bzw. reduziert (siehe Bild 29). Unter Beachtung der Messunsicherheit ist in der Kategorie  $< 30$  ein Natursand als kritisch anzusehen, in der Kategorie  $\geq 30$  sind ein Brech- und ein Natursand nicht mehr deutlich zuzuordnen und in der Kategorie  $\geq 35$  liegen ein Brech- und ein Natursand im Grenzbereich.

Um den Grenzbereich näher zu betrachten und mögliche Zusammenhänge zwischen Korngrößenverteilung und Formkennwerten zuerkennen, wurden die Sieblinien nach DIN EN 933-1 und die Partikelverteilung der „Camsizermessung®“ von Sanden mit der „kennzeichnende Formkenngröße“ der Sphärizität von ca. 0,810 betrachtet (siehe Bild 30). Ein Vergleich der Sieblinien von Brech- und Natursand mit der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärizität von ca. 0,810 gibt keine Hinweise darauf, dass ein Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung und der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärizität besteht.

Die Partikelmessungen mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ zeigen, dass es möglich

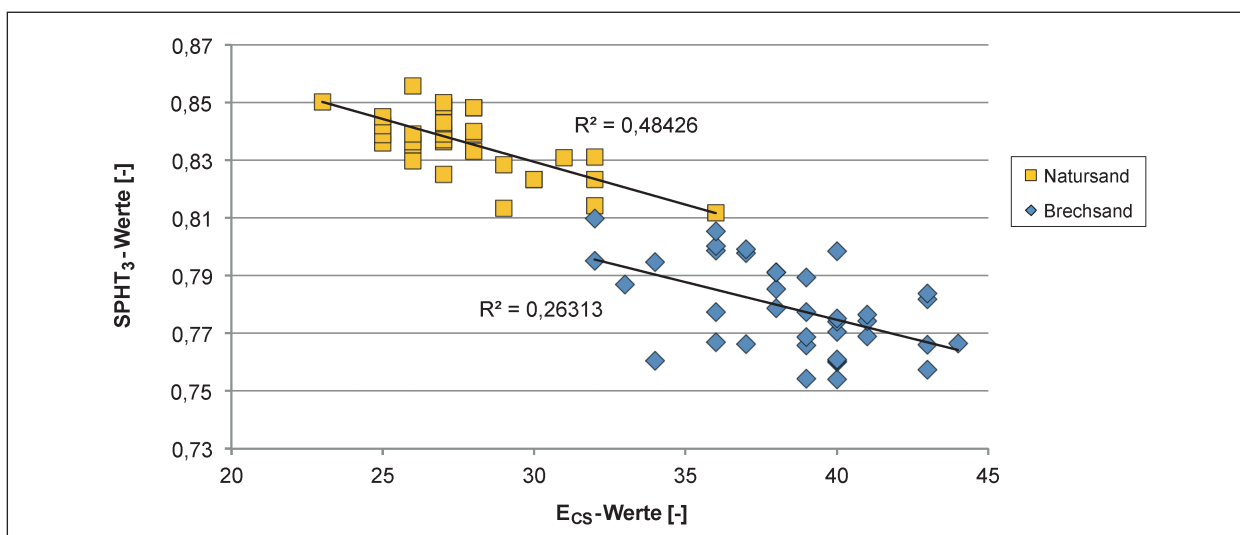
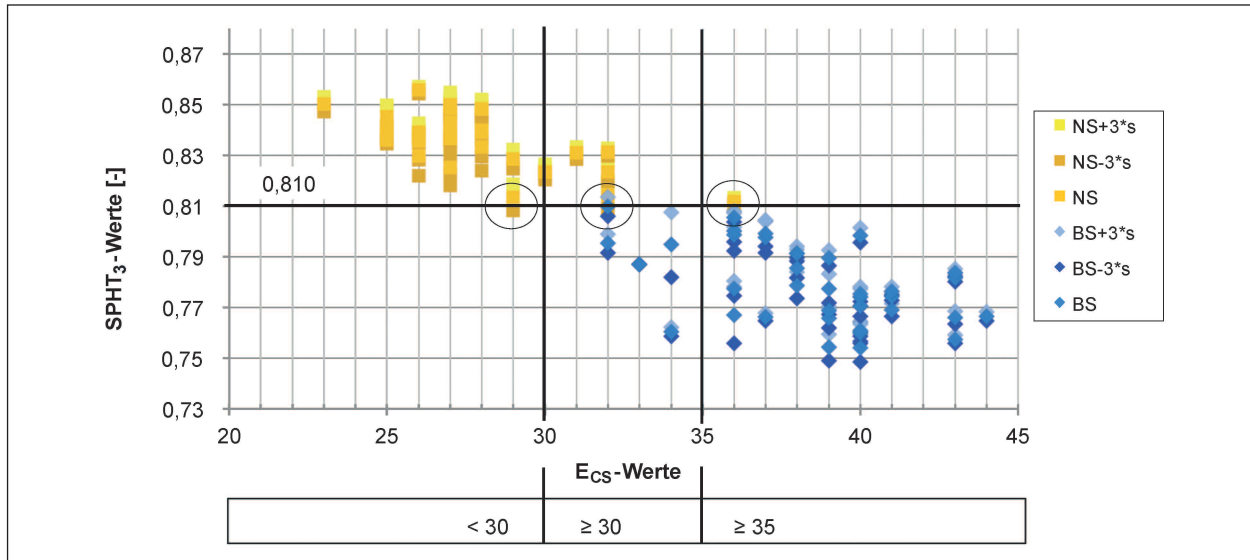
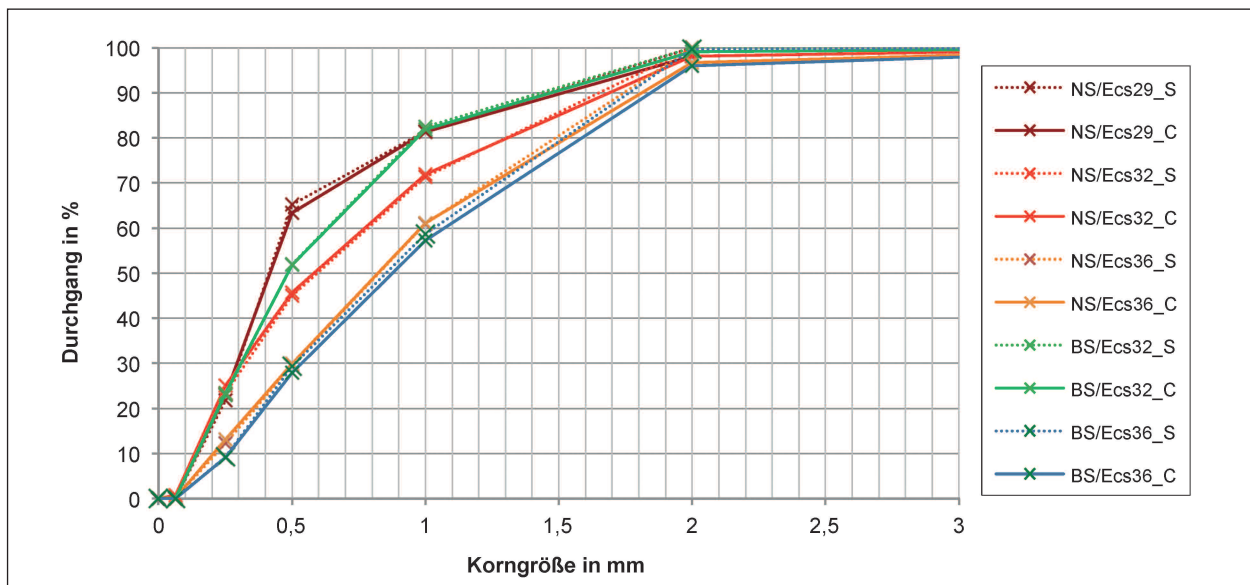


Bild 28: Korrelation zwischen den SPHT<sub>3</sub>-Werten und den  $E_{CS}$ -Wert





**Bild 29:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ ( $FK_{SPHT3}$ ) der Sphärizität unter Berücksichtigung der Messunsicherheit von  $\pm 3$  Standardabweichungen und den  $E_{CS}$ -Werten, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



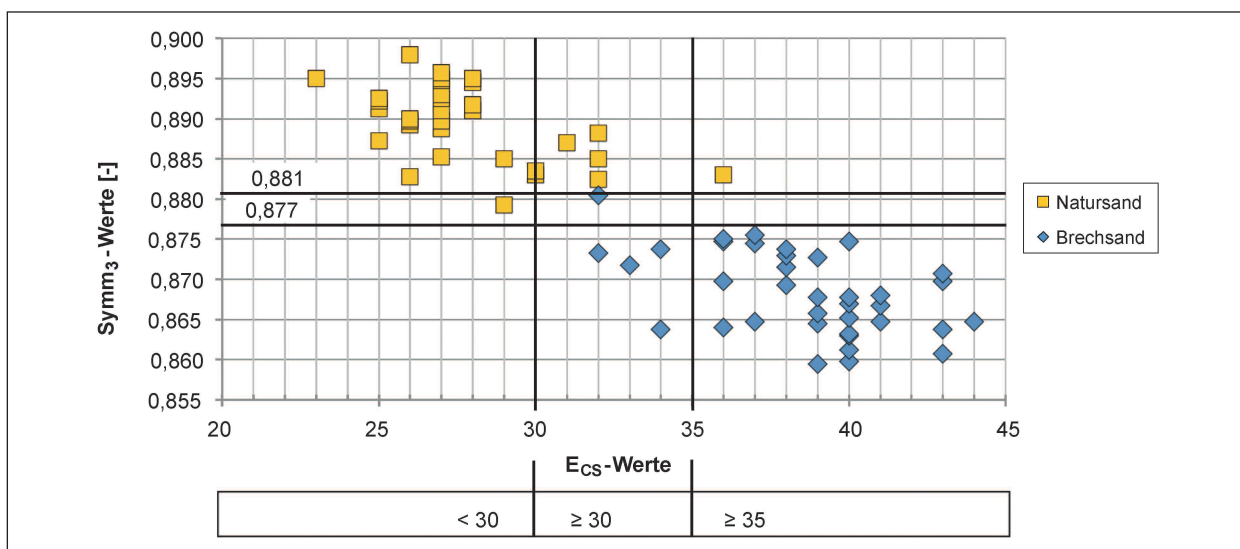
**Bild 30:** Vergleich der Sieblinien von Brech- und Natursand mit einem „kennzeichnenden Formkennwert“ der Sphärizität von ca. 0,810

ist, anhand von Formparametern Kornformmerkmale von feinen Gesteinskörnungen darzustellen. Es kann derzeit aber nicht eindeutig auf die Gewinnungsart Brech- oder Natursand geschlossen werden.

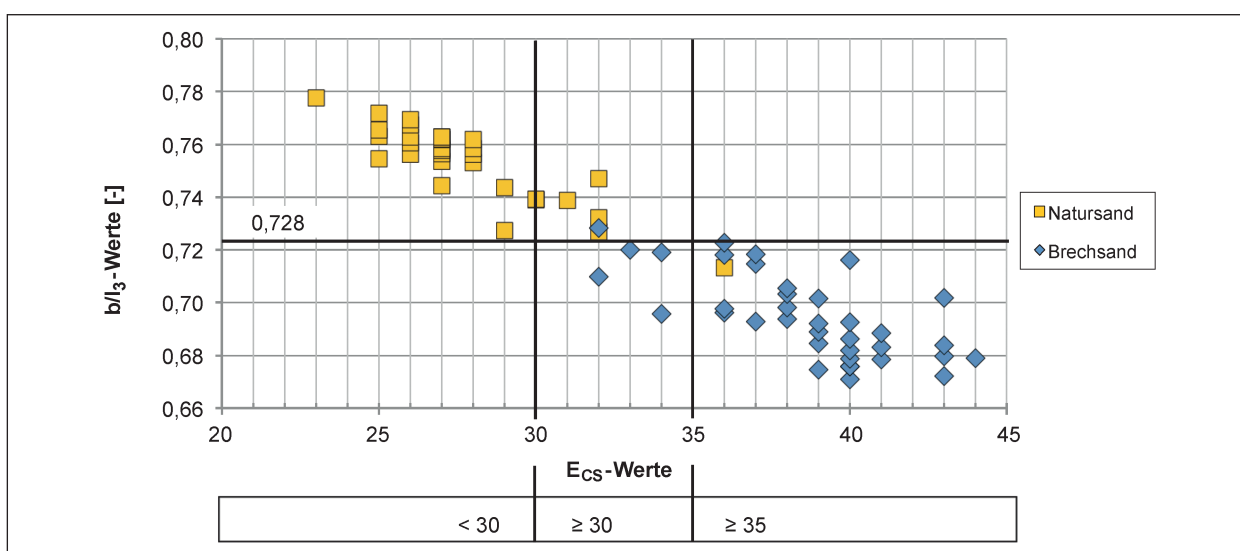
### 9.2.3.2 Formkenngröße der Symmetrie

Für die Symmetrie gilt, je höher der Wert ist, desto symmetrischer ist die Form. Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Symmetrie ( $FK_{Symm3}$ ) des Natursandes erreichen Werte zwischen 0,898 und 0,879 (siehe Bild 31). Die  $FK_{Symm3}$  der Brech-

sande liegen zwischen 0,881 und 0,860. Die maximale Spannweite ( $w_4$ ) der Messwerte beträgt 0,4 % und die Standardabweichung ( $s$ ) ist durchschnittlich unter 0,04 %. Demzufolge sind die Messungen als präzise einzustufen. Eine Trennungslinie kann zwischen Brech- und Natursand bei  $Symm_3$  0,877 oder 0,881 gezogen werden. Jeweils ein Brechsand bzw. ein Natursand lässt sich nicht eindeutig zuordnen. Daher ist es mit der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Symmetrie nicht möglich, eine deutliche Abgrenzung zwischen Brech- und Natursand darzustellen.



**Bild 31:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ ( $FK_{Symm3}$ ) der Symmetrie von 69 Brech- und Natursandproben und den dazugehörigen  $E_{CS}$ -Werten, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



**Bild 32:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ ( $FK_{b/l3}$ ) des b/l-Verhältnisses von 69 Brech- und Natursandproben und den dazugehörigen  $E_{CS}$ -Werten, Bezugsgröße  $x_{c \min}$

### 9.2.3.3 Formkenngröße des Breiten-/Längenverhältnisses

Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ des Breiten-/Längenverhältnisses ( $FK_{b/l3}$ ) sind in Bild 32 dargestellt. Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Natursande liegen zwischen 0,778 und 0,713. Die  $FK_{b/l3}$  der Brechsande liegen zwischen 0,728 und 0,671. Die maximale Spreizung der Messwerte liegt bei 0,4 %, die Standardabweichung ist kleiner 0,1 %. Weitestgehend lassen sich die Natursande mit dem Breiten-/Längenverhältnis als  $> 0,728$  und für Brechsand als  $\leq 0,728$  einstufen. Die Sande, die bei der Sphärizität im Bereich der Trennungslinie lagen, liegen auch hier im

Grenzbereich (siehe Bild 29). Eine eindeutige Trennung zwischen Natur- und Brechsand ist auch hier nicht möglich.

### 9.2.4 Ergebnisse der Formkenngrößenbestimmung nach Kornklassen

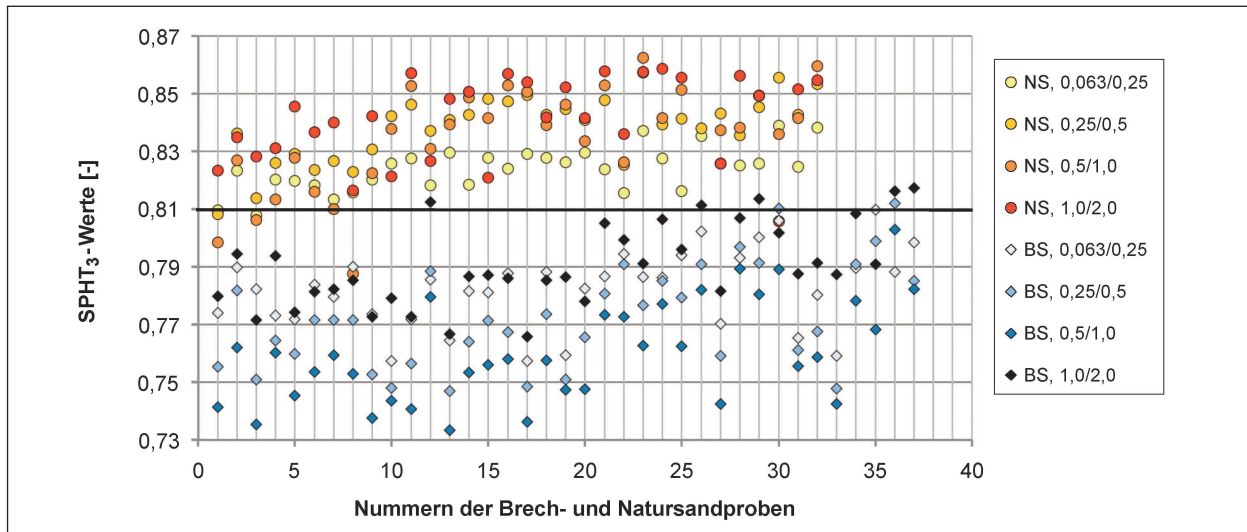
#### 9.2.4.1 Formkenngröße der Sphärizität in Abhängigkeit von der Kornklasse

Ebenso wie für die gesamte Probe wurden für unterschiedliche Kornklassen die Formparameter bestimmt. Die Einteilung der Kornfraktionen erfolgte nach den Siebgrößen für feine Gesteinskörnungen. Nachfolgend sind für alle Brech- und Natursande

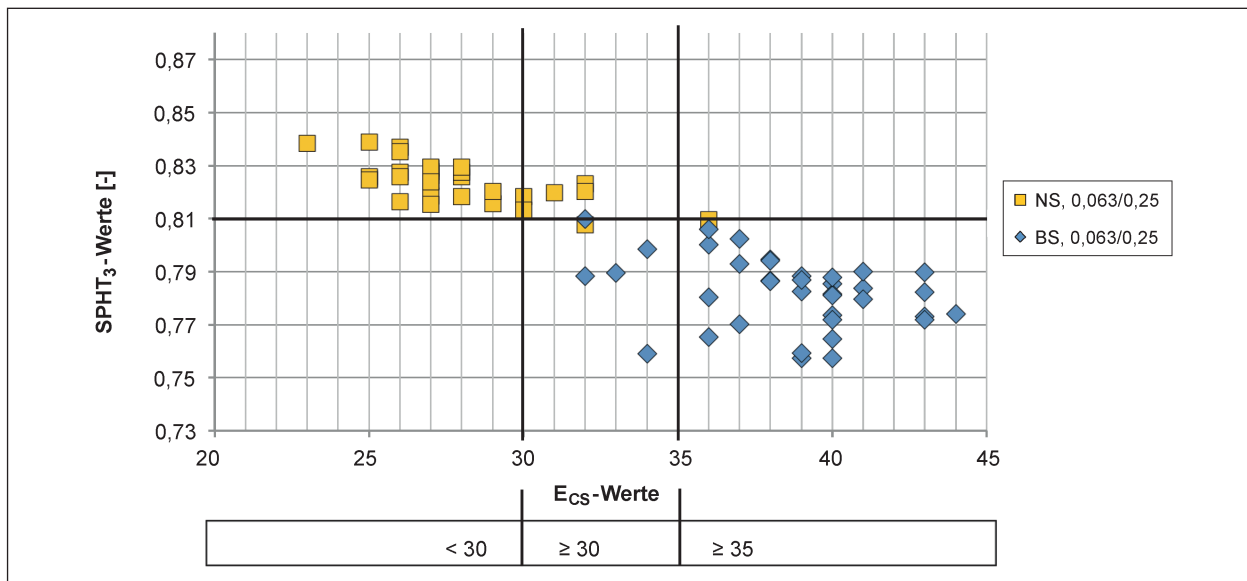
die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität ( $FK_{SPHT_3}$ ) in Abhängigkeit zu den unterschiedlichen Kornklassen dargestellt (siehe Bild 33). Die  $FK_{SPHT_3}$ -Werte der Sandproben sind relativ breit gestreut. Beispielsweise für eine Basaltprobe (Nummer 3) werden für die Kornklasse 0,063/0,25  $FK_{SPHT_3}$ -Werte von 0,782 und für die Kornklasse 0,5/1,0  $FK_{SPHT_3}$ -Werte von 0,735 gemessen. Für die „kennzeichnende Formkenngröße“ der Basaltprobe wird ein  $FK_{SPHT_3}$ -Wert von 0,758 ermittelt. Es zeigt sich, dass durch die Differenzierung in unterschiedliche Kornklassen keine bessere Unterscheidung von Natursand und Brechsand möglich ist.

Um dies zu verdeutlichen, werden die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität entsprechend der Kornklassen in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt. Zur Orientierung wird die für alle Proben die ermittelte Trennungslinie bei  $SPHT_3$  0,810 (siehe Bild 25) zwischen Natur- und Brechsand abgebildet.

Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität der Korngröße 0,063 bis 0,25 mm des Natursandes liegen zwischen  $FK_{SPHT_3}$  0,808 und 0,839 (siehe Bild 34). Die Spreizung der  $FK_{SPHT_3}$ -Werte ist relativ gering. Die  $FK_{SPHT_3}$ -Werte des Brechsandes liegen im Bereich zwischen 0,757 und 0,810. Drei Sandproben lassen sich nicht eindeutig



**Bild 33:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität ( $FK_{SPHT_3}$ ) von allen Natur- und Brechsandproben in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kornklassen, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



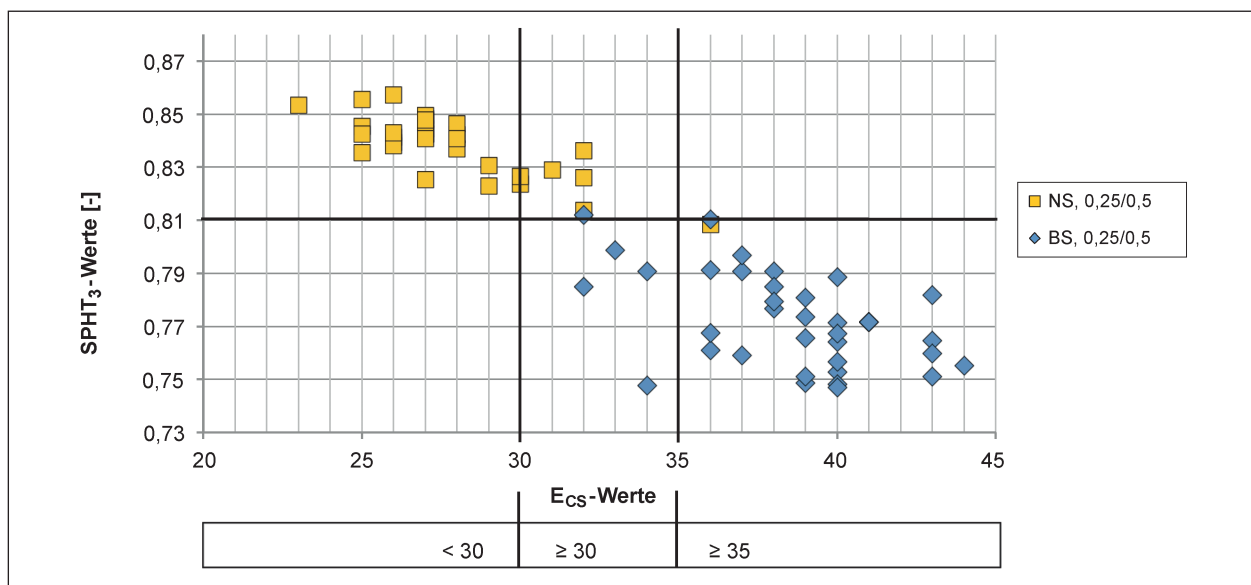
**Bild 34:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität ( $FK_{SPHT_3}$ ) der Korngröße 0,063 bis 0,25 mm, Bezugsgröße  $x_{c \min}$

charakterisieren, sodass eine eindeutige Unterscheidung zwischen Brech- und Natursand nicht möglich ist.

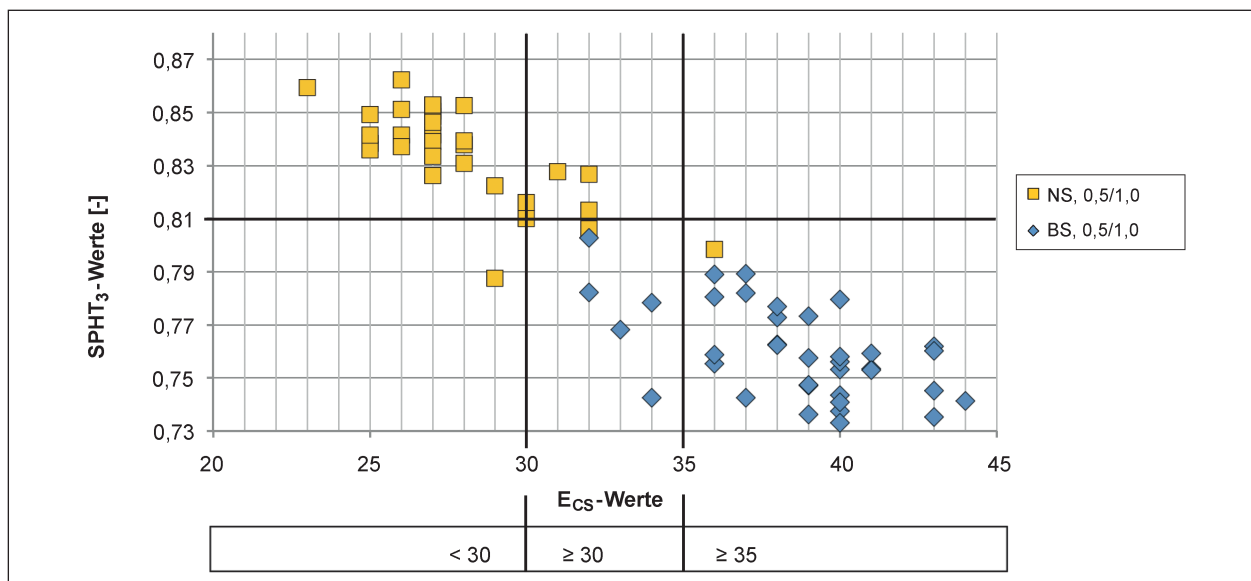
Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ ( $FK_{SPHT3}$ ) der Kornklasse 0,25 bis 0,5 mm sind in Bild 35 dargestellt. Der Natursand erreicht  $FK_{SPHT3}$ -Werte zwischen 0,808 und 0,857 und die Werte der Brechsande liegen zwischen 0,748 und 0,812. Augenscheinlich wirkt die Verteilung der Formkenngrößen des Natursandes ähnlich wie die der gesamten Probe. Die Werte der Brechsande liegen etwas niedriger. Vier Sandproben liegen im

Bereich der Bezugslinie. Zwischen Brech- und Natursand lässt sich nicht eindeutig unterscheiden.

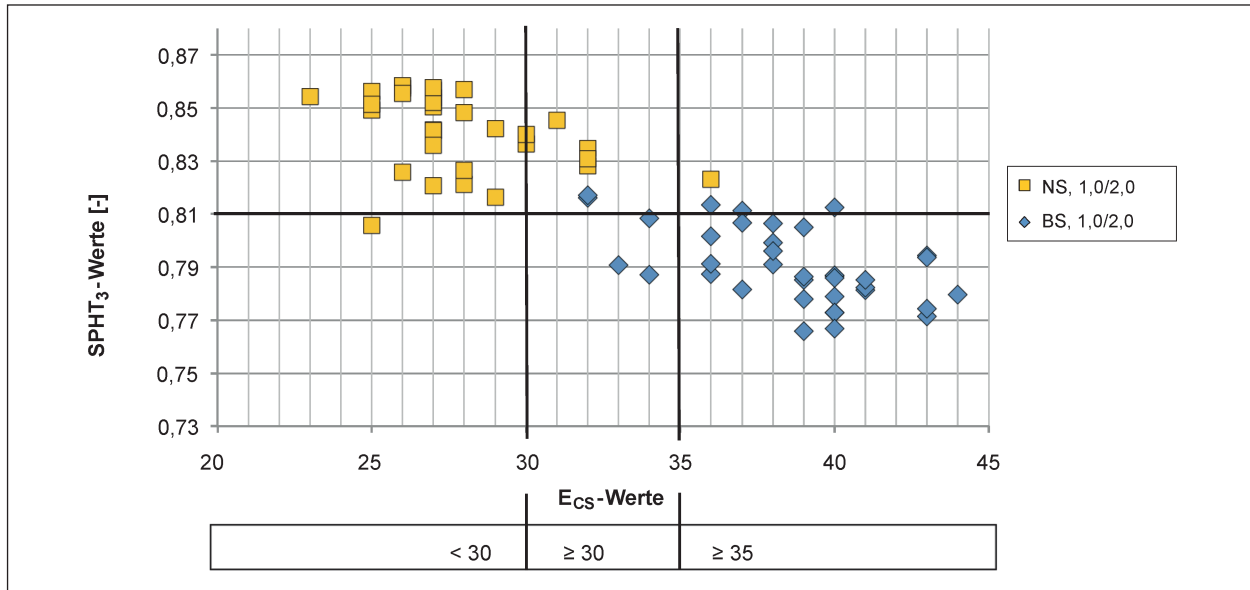
Für die Kornklasse 0,5 bis 1,0 mm ist die Spreizung der  $FK_{SPHT3}$ -Werte von Natursand als auch Brechsand am größten (siehe Bild 36). Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Natursande erreichen  $FK_{SPHT3}$ -Werte zwischen 0,788 und 0,862 und der Brechsand Werte zwischen 0,733 und 0,803. Von den Natursandproben liegen einige Sandproben im Grenzbereich bzw. unterhalb der Trennungslinie, sodass der Natursand nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Die „kennzeichnenden



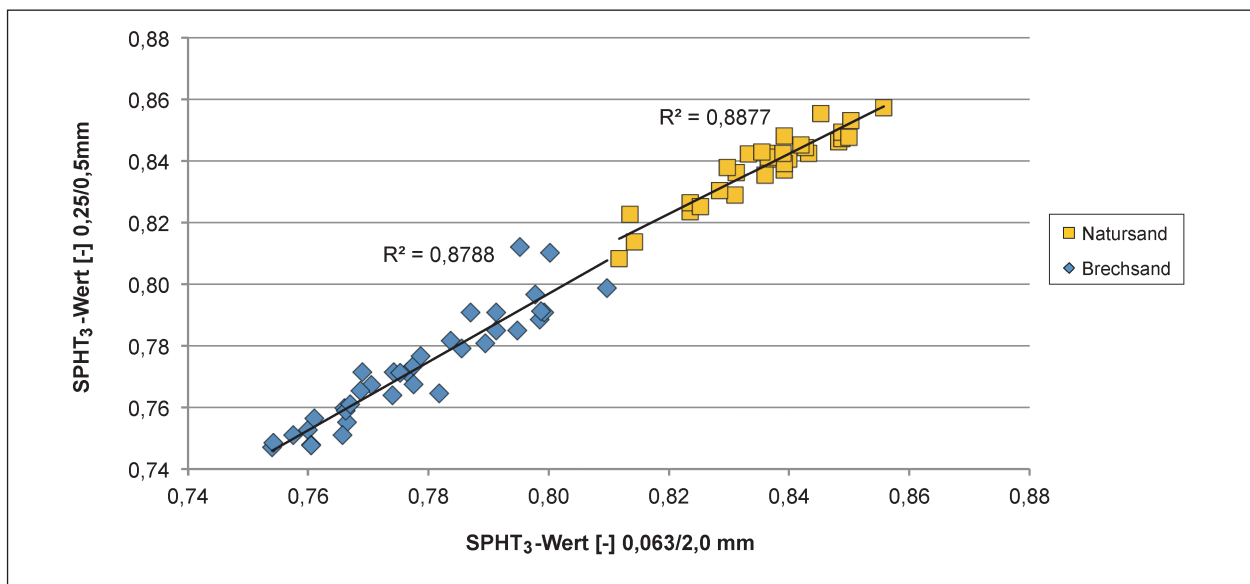
**Bild 35:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität ( $FK_{SPHT3}$ ) der Korngröße 0,25 bis 0,5 mm, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



**Bild 36:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität ( $FK_{SPHT3}$ ) der Korngröße 0,5 bis 1,0 mm, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



**Bild 37:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität ( $FK_{SPHT3}$ ) der Korngröße 1,0 bis 2,0 mm, Bezugsgröße  $x_c$  min



**Bild 38:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärität ( $FK_{SPHT3}$ ) der Korngröße 10,063/0,25 mm und der gesamten Probe 0,063/2,0 mm

Formkenngrößen“ ( $FK_{SPHT3}$ ) des Brechsandes liegen eindeutig unter der Trennungslinie und charakterisieren den Brechsand.

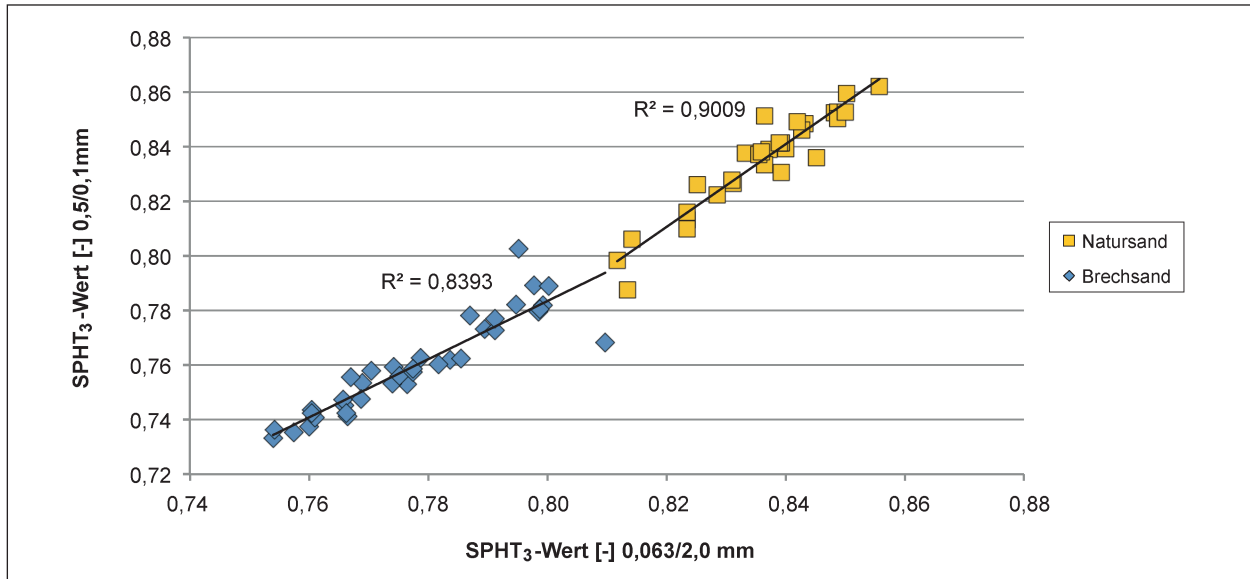
Die Natursande der Kornklasse 1,0 bis 2,0 mm erreichen  $FK_{SPHT3}$ -Werte zwischen 0,806 und 0,859 und die Brechsande Werte zwischen 0,766 und 0,816 (siehe Bild 37). Eine deutliche Trennung zwischen Natursand und Brechsand ist für die Kornklasse nicht mehr zutreffend.

Im Vergleich einzelner Kornklassen mit der gesamten Probe wird deutlich, dass der Brechsand der Kornklasse 0,25/0,5 mm und der Natur-

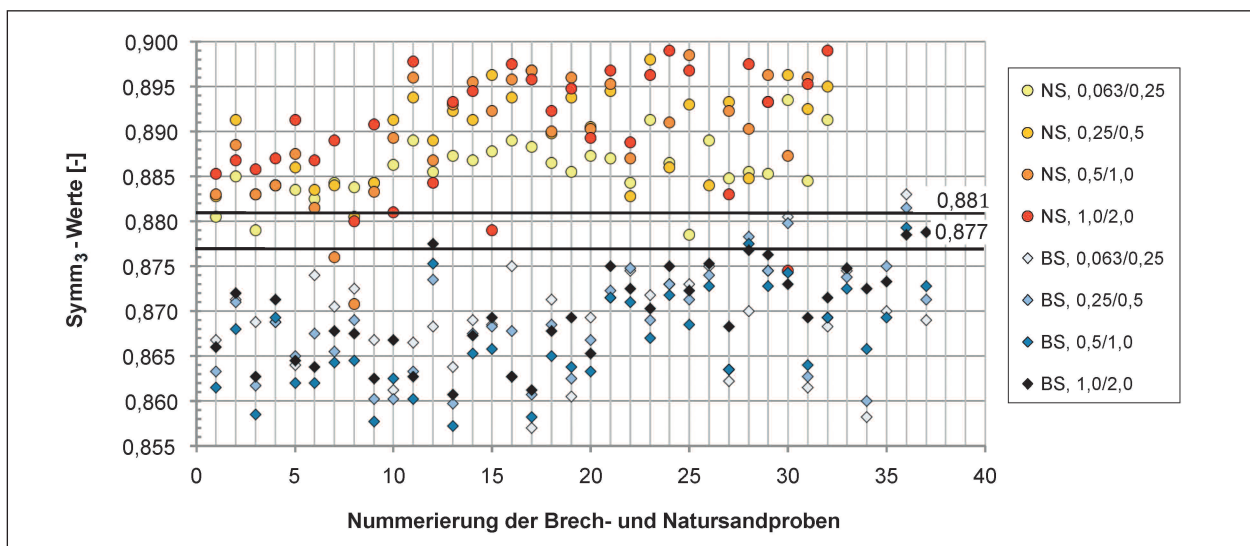
sand der Kornklasse 0,5/1,0 mm die größten Übereinstimmungen zeigen (siehe Bild 38 und Bild 39). Die übrigen Korngrößen haben eine geringere Übereinstimmung mit der gesamten Probe.

#### 9.2.4.2 Formkenngröße der Symmetrie in Abhängigkeit von der Kornklasse

Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Symmetrie ( $FK_{Symm3}$ ) werden entsprechend der Kornklassen in Bild 40 dargestellt. Zur Orientierung wird die Trennungslinie ( $Symm_3$  0,877 und 0,881) zwi-



**Bild 39:** Vergleich der „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärizität ( $FK_{SPHT3}$ ) der Kornklasse 0,5/1,0 mm und der gesamten Probe 0,063/2,0 mm



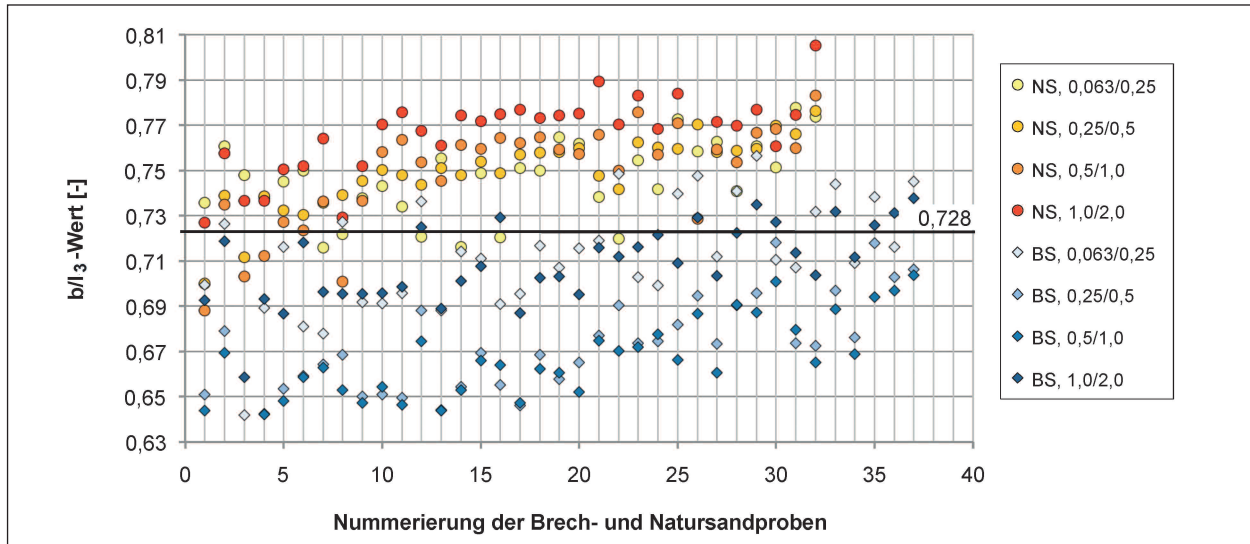
**Bild 40:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Symmetrie ( $FK_{Symm3}$ ) von Natur und Brechsand in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kornklassen, Bezugsgröße  $x_{c, min}$

schen Natur- und Brechsand, die in Bild 31 dargestellt werden konnte, abgebildet. Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Symmetrie lassen sich nicht eindeutig entsprechend der Kornklassen differenzieren. Liegt die Trennungslinie bei  $Symm_3$  0,877, kann bei den Natursanden nur die Kornklasse 0,5 bis 1,0 mm nicht deutlich dem Bereich der Natursande zugeordnet werden. Bei den Brechsanden sind es mehrere Sande, die nicht im zugehörigen Bereich liegen. Wird die Trennungslinie bei  $Symm_3$  0,881 festgelegt, kann nur die Kornklasse 0,25 bis 0,5 mm eindeutig den Natursanden zugeordnet werden. Bei den Brechsanden liegen zwei Kornklassen des Sandes mit der Nummer 38 ober-

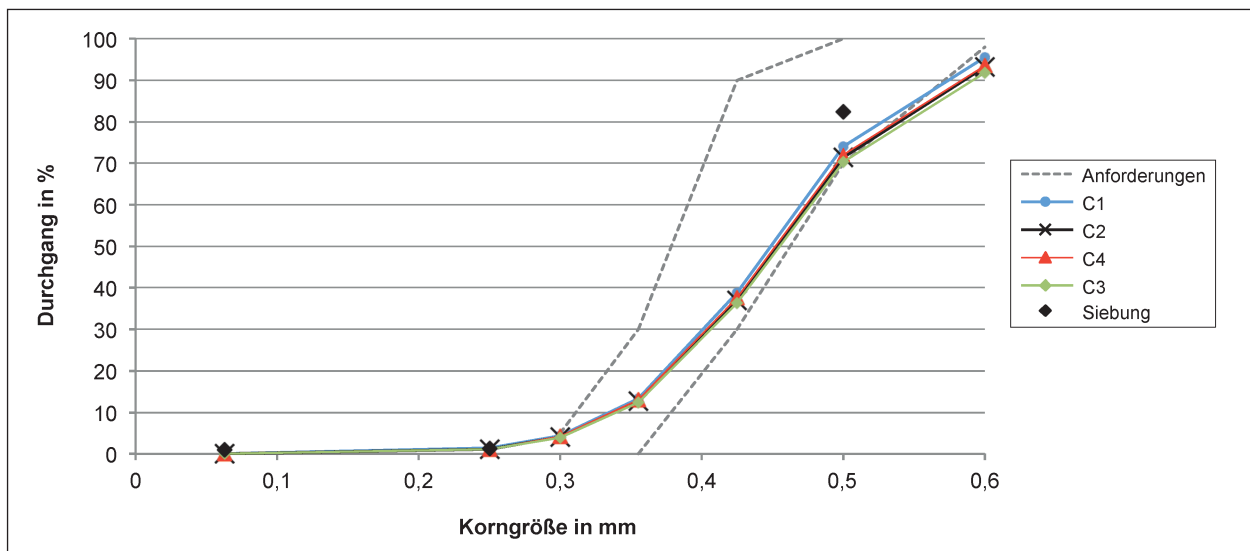
halb der Trennungslinie, alle anderen Brechsande lassen sich zuordnen.

#### 9.2.4.3 Formkenngröße des Breiten-/Längenverhältnisses in Abhängigkeit von der Kornklasse

Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ des Breiten-/Längenverhältnisses ( $FK_{b/l3}$ ) werden entsprechend der Kornklassen in Bild 41 dargestellt. Zur Orientierung wird die Trennungslinie ( $b/l_3$ : 0,728) zwischen Natur- und Brechsand, die für die gesamte Probe ermittelt werden konnte, dargestellt (siehe Bild 32). Die „kennzeichnenden Formkenngrößen“



**Bild 41:** Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ des b/l-Verhältnisses ( $FK_{b/l3}$ ) von Natur- und Brechsand in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kornklassen, Bezugsgröße  $x_{c \min}$



**Bild 42:** Darstellung der Anforderungen an das Poliermittel Korund und die Korngrößenverteilungen gemessen mit dem „Camsizer“ (C1-C4) und die Siebung nach DIN EN 933-1 punktuell dargestellt

des Breiten-/Längenverhältnisses zeigen eine breitere Spreizung als die  $FK_{SPHT3}$ -Werte und die  $FK_{Symm3}$ -Werte. Der Natursand der Kornklasse 1,0 bis 2,0 mm kann deutlich dem Bereich der Natursande zugeordnet werden. Der Brechsand der Kornklasse 0,25 bis 0,5 mm und 0,5 bis 1,0 mm kann deutlich dem Bereich der Brechsande zugeordnet werden.

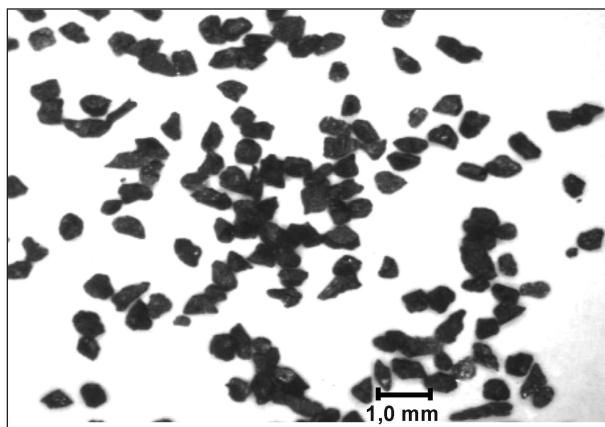
### 9.2.5 Poliermittel Korund

Um der Frage nachzugehen, inwieweit sich der „Camsizer“ zur Qualitätskontrolle von sehr enggestuftem Poliermittel eignet, wurden Messungen mit dem Poliermittel Korund durchgeführt. Der Korund

soll nach DIN EN 1097-8 den Anforderungen an die Korngrößenverteilung der Tabelle 15 entsprechen.

In Bild 42 sind die Messungen mit dem „Camsizer“ als Summenkurve und die Anforderungen an die Korngrößenverteilung dargestellt. Die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 wurde punktuell für die Korngröße 0,25 und 0,5 mm dargestellt. Die Messwerte des „Camsizers“ liegen bis 0,5 mm im Bereich der Anforderungen. Die Messwerte  $> 0,5$  mm weichen sowohl von dem Messpunkt der Korngrößenverteilung, als auch von dem Anforderungsbereich für Poliermittel ab.

Als Qualitätskontrolle für Poliermittel ist der „Camsizer“ bedingt geeignet.



Korngröße	Siebdurchgang in %
0,600	98 bis 100
0,500	70 bis 100
0,425	30 bis 90
0,355	0 bis 30
0,300	0 bis 5

Tab. 15: Anforderungen an die Korngrößenverteilung nach DIN EN 1097-8 und Poliermittel Korund

## 10 Beurteilung der Ergebnisse

Die geprüften Natursande als auch Brechsande decken eine umfangreiche Bandbreite von Gesteinskörnungen ab. Es wurde zunächst von 69 Sandproben der Fließkoeffizient  $E_{CS}$  als Bewertungsgrundlage für feine Gesteinskörnungen bestimmt. Die Messungen ergaben einen Überschneidungsbereich in den Kategorien  $\geq 30$  und  $\geq 35$ , sodass nicht eindeutig auf die Gewinnungsart Brech- oder Natursand geschlossen werden kann. Mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ sollte geprüft werden, inwieweit es möglich ist, charakteristische Kornformmerkmale von feinen Gesteinskörnungen zu bestimmen. Des Weiteren wurde geprüft, ob damit eine Unterscheidung von Brech- und Natursand möglich ist. Zunächst wurde die Korngrößenverteilung für die Sande nach DIN EN 933-1 bestimmt und ins Verhältnis zu den Partikelmessungen mit dem „Camsizer®“ gesetzt. Dazu wurden die Einzelwerte der Teilproben zur mittleren Partikelverteilung zusammengefasst. Eine Übereinstimmung der Summenkurven konnte nicht für alle Sande festgestellt werden, aber ein vergleichbarer Verlauf der Messwerte ist zu erkennen.

Die Formparameter der Sphärizität (SPHT), der Symmetrie (Symm) und das Breiten-/Längenverhältnis (b/l) wurden gewählt, um die Kornformmerkmale der Gesteinskörnungen 0,063 bis 2 mm zu beschreiben. Es wurde herausgearbeitet, dass die

volumenbezogene Auswertung differenziertere Ergebnisse liefert als die anzahlbezogene Auswertung. Daher wurden die weiteren Messergebnisse volumenbezogen ausgewertet. Je vier Teilproben der Brech- und Natursande wurden zur „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Sphärizität ( $FK_{SPHT3}$ ) zusammengefasst. Die Messwerte konnten aufgrund der Standardabweichung und der Spannweite der Vierfachbestimmung als präzise eingestuft werden. Durch die Darstellung der „kennzeichnenden Formkenngrößen“ der Sphärizität konnte eine „knappe“ Trennungslinie ( $FK_{SPHT3} = 0,810$ ) zwischen Brech- und Natursand herausgearbeitet werden. Zur eindeutigen Abgrenzung zwischen Natursand und Brechsand wurden die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ mit dem Messunsicherheitsfaktor ( $k = 3$ ) erweitert bzw. reduziert. Die zuvor gezogene Trennungslinie konnte damit nicht mehr aufrecht erhalten werden.

Mit den „kennzeichnenden Formkenngröße“ der Symmetrie lassen sich die Brech- und Natursande überwiegend unterscheiden. Es liegen jedoch zwei Sande im Grenzbereich, sodass zwischen Brech- und Natursand keine deutliche Trennung dargestellt werden kann.

Ebenso werden für das Breiten-/Längenverhältnis charakteristische Formparameter herausgearbeitet. Es ist jedoch nicht möglich, eindeutige Unterschiede zwischen Brech- und Natursand darzustellen.

Werden die „kennzeichnenden Formkenngrößen“ nach Kornfraktionen betrachtet, zeigt sich, dass nur für wenige Kornklassen eine eindeutige Trennung zwischen Brech- und Natursand möglich ist.

Die Partikelmessungen mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ zeigen, dass es möglich ist, anhand von Formparametern und der Partikelgrößenverteilung, Kornformeigenschaften von feinen Gesteinskörnungen darzustellen. Es ist jedoch nicht möglich, für die Kornform eindeutige Unterscheidungsmerkmale zwischen Brech- und Natursand festzulegen.

Auch wenn keine eindeutige Unterscheidung zwischen Brech- und Natursand mit dem optischen Messgerät möglich ist, können charakteristische Merkmale der Sande mit den Formparametern dargestellt werden. Da sich in der Praxis Brechsande für den Einsatz im Asphalt bewährt haben, ist für die Praxis von Interesse, wie die unterschiedlichen Formkenngrößen sich in Gemischen aus Gesteinskörnungen, Asphalt oder Betonen auswirken.



Für die Qualitätskontrolle von sehr enggestuftem Poliermittel wie Korund ist der Camsizer® bedingt geeignet. Es gibt geeignetere Verfahren, um dies zu überprüfen.

## 11 Bewertung des Prüfverfahrens und Ausblick

Mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ ist es möglich die Partikelverteilung von Sanden darzustellen und charakteristische Kornformmerkmale zu bestimmen. Zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse müssen jedoch die nachfolgend erläuterten Randbedingungen eingehalten werden.

Notwendig für eine einheitliche Auswertung ist die Konfiguration der Software, da mit der Einstellung „kugelförmige Partikel“ oder „eckige Partikel“ der Randbereich der Partikel unterschiedlich bewertet wird. Insbesondere beim Breiten-/Längenverhältnis wirken sich die unterschiedlichen Einstellungen auf die Messwerte aus. Die Anpassung der Messdichte ist unter anderem von der Größe der Partikel abhängig. Für feine Gesteinskörnung hat sich die Einstellung „Solldichte der Partikel: 1,0“ als ausreichend erwiesen. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu bekommen, ist es notwendig, eine hinreichende Probenmenge (ca. 500.000 bis 1 Mill. Partikel) zu messen. Für feine Gesteinskörnungen ist eine Probenmenge von 130 g ausreichend.

Zur Charakterisierung der feinen Gesteinskörnungen wurden vier Teilproben gemessen und der Mittelwert als „kennzeichnende Formkenngröße“ der Sphärizität, der Symmetrie und des Breiten-/Längenverhältnisses angegeben. Entsprechend wurden für jede Kornklasse „kennzeichnende Formkenngrößen“ ermittelt.

Nach Auswertung der Messergebnisse zeigte sich, dass charakteristische Kornformmerkmale für die geprüften Brech- und Natursande dargestellt werden können. Eine eindeutige Unterscheidung zwischen Brech- und Natursand konnte jedoch nicht für alle Sandproben festgestellt werden. Auch bei Betrachtung einzelner Kornklassen konnte keine eindeutige Zuordnung getroffen werden.

Auch im Forschungsprojekt (WÖRNER, NEIDINGER, WESTINER, 2012) zeigte sich, dass es möglich ist, mit einem optischen Messgerät granulometrische Eigenschaften zu bestimmen. Die computerunterstützte Partikelanalyse dort wurde mit der

CPA 4-2 der Firma Haver & Boecker durchgeführt. Außerdem wurden Vergleichsuntersuchungen mit zwei weiteren optischen Messsystemen, der Firma Retsch Technology und der Firma Sympatec GmbH, durchgeführt. Bei der CPA erfolgt die Aufnahme anhand eines Linien-Scans, die beiden anderen Messsysteme bedienen sich der dynamischen Bildanalyse. Die drei Anbieter weisen deutliche Unterschiede in ihren Ergebnissen auf. Alle Systeme ermöglichen prinzipiell sowohl die Messung der Partikelgrößenverteilung, als auch die Bestimmung der Partikelform. Die Messsysteme haben für die Auswertung sehr vielfältige Möglichkeiten, jedoch erfolgt diese unterschiedlich detailliert. Die Sphärizität als Formparameter und das Breiten-/Längenverhältnis wurden von allen bestimmt. Diese sind jedoch unterschiedlich definiert und das umgedrehte Verhältnis wird teils herangezogen (WÖRNER, NEIDINGER, WESTINER, 2012).

Die oben genannten Aussagen zeigen, dass es schwierig ist, die verschiedenen Messtechniken miteinander zu vergleichen. Daher wird es für die Zukunft notwendig sein Formparameter (beispielsweise die Sphärizität und das Breiten-/Längenverhältnis) festzulegen und einheitlich zu definieren.

## 12 Zusammenfassung

Feine Gesteinskörnungen beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften von Asphalt und Beton, als auch die Eigenschaften von Gemischen aus Gesteinskörnungen. Da die gebräuchlichen Begriffe „Brechsand“ und „Natursand“ zur Charakterisierung von Sanden und Gemischen mit Einführung der TL Gestein-StB entfallen sind, sollte im Rahmen dieses Projektes geprüft werden, inwieweit Unterscheidungen mit einem optischen Partikelmessgerät möglich sind.

In diesem Projekt kam das optische Messgerät „Camsizer®“ der Firma Retsch Technology zum Einsatz. Der „Camsizer®“ ist ein Messgerät zur Partikelanalyse, das entwickelt wurde, um trockene und rieselfähige Schüttgüter zu charakterisieren. Er ist mit einer Basic- und einer Zoomkamera ausgestattet, die die Schattenprojektionen der Partikel erfassen. Für die Messungen können verschieden definierte Partikelgrößen und Formparameter ausgewählt werden. Zur Erzielung einer guten Wiederholpräzision muss die Probenteilung und Vorbereitung der Proben äußerst sorgfältig erfolgen.

In den Voruntersuchungen wurden zunächst verschiedene Parameter untersucht, die die Messungen beeinflussen können. Nach Auswertung der Messergebnisse wurde für die Hauptuntersuchungen festgelegt, dass die Messungen mit der Einstellung „kugelförmige Partikel“ und der „Solldichte: 1“ durchgeführt werden. Für die Auswertung der Messungen wurden die Partikelgrößendefinition  $x_{C \min}$  und die Formparameter der Sphärizität, der Symmetrie und das Breiten-/Längenverhältnis festgelegt. Die Einschätzung der Genauigkeit des Prüfverfahrens wurde mittels der Richtigkeit und der Präzision der Messungen überprüft. Zur Einschätzung der Richtigkeit des Messverfahrens wurde die mittlere Partikelverteilung der „Camsizer®“-Messung und die konventionellen Sieblinie nach DIN EN 633-1 als Bezugsgröße gewählt. Es konnte an Hand der vier Sandproben eine zufriedenstellende Übereinstimmung festgestellt werden. Zur Einschätzung der Präzision des Messverfahrens wurden die Übereinstimmung der Partikelverteilung und der Formparameter (Sphärizität) je Teilprobe betrachtet. Die festgestellte Übereinstimmung war groß. Daher ist die Genauigkeit des Prüfverfahrens positiv einzuschätzen.

Die Hauptuntersuchungen wurden an 69 sorgfältig vorbereiteten Brech- und Natursandproben der Korngröße 0,063 bis 2 mm durchgeführt. Um eine Bewertungsgrundlage zu schaffen, wurde zunächst der Fließkoeffizient ermittelt und die Korngrößenverteilung nach DIN 933-1 bestimmt. Für die Messungen mit dem „Camsizer®“ wurden die Sandproben geteilt und je vier Teilproben gemessen. Aus den Einzelwerten der Teilprobe wurde die mittlere Partikelverteilung und für die Formparameter der Mittelwert bezeichnet als „kennzeichnende Formkenngröße“ der Sphärizität, der Symmetrie oder des Breiten-/Längenverhältnisses gebildet.

Zunächst wurde die „kennzeichnende Formkenngröße“ der Sphärizität volumen- und anzahlabhängig ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse der volumenbezogenen Auswertung differenzierter waren und eine „knappe“ Trennung zwischen Natursand und Brechsand möglich machten. Jedoch unter Beachtung von Messunsicherheiten kann die Trennung zwischen Natur- und Brechsand nicht als gesichert betrachtet werden. Auch für die Formkenngrößen der Symmetrie und für das Breiten-/Längenverhältnis konnten Unterschiede festgestellt, aber keine deutliche Trennung zwischen Brech- und Natursand dargestellt werden. Die Formkenngrößen nach Kornklassen auszuwerten

konnte auch keine deutliche Trennung hervorbringen.

Die Partikelmessungen mit dem optischen Partikelmessgerät „Camsizer®“ zeigen keine eindeutigen Unterscheidungsmerkmale zwischen Brech- und Natursand. Es können jedoch anhand der Partikelgrößenverteilung und der Formparameter charakteristische Kornformigenschaften von feinen Gesteinskörnungen dargestellt werden. Da sich in der Praxis Brechsande für den Einsatz im Asphalt bewährt haben, ist für die Praxis von Interesse, bei welchen Parametern es sich um zweckmäßige Einflussgrößen handelt und wie sich die unterschiedlichen Formkenngrößen in Gemischen aus Gesteinskörnungen, Asphalten oder Betonen auswirken.

Auch im Forschungsprojekt (WÖRNER, NEIDINGER, WESTINER, 2012) zeigte sich, dass es möglich ist, mit einem optischen Messgerät die granulometrischen Eigenschaften zu bestimmen. Im Falle des zuvor genannten Projektes wurden die Messungen mit der CPA der Firma Haver & Boecker durchgeführt. Beide Messsysteme haben vielfältige Möglichkeiten, die Auswertung erfolgt allerdings unterschiedlich. Die Formparameter der Sphärizität und das Breiten-/Längenverhältnis können von beiden bestimmt werden, sie sind jedoch unterschiedlich definiert. Daher ist es zum jetzigen Zeitpunkt schwierig, die verschiedenen Messergebnisse miteinander zu vergleichen. Sollten optische Messgeräte für die Zukunft interessant werden, sollten die Formparameter einheitlich definiert werden.

## 13 Literatur

- AA 6.1 „Gesteinskörnungen“ Auszug aus der Niederschrift über die 6. Sitzung am 24. und 25. 09. 2009
- DIN EN 13043 (2002-12): Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen
- DIN EN 933-1 (2006): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
- DIN EN 933-6 (2002-02): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen –

- Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften – Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen
- DIN ISO 9276-6 (2012-01): Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln
- DÜFFELS, K. (2010): Messbericht, Bestimmung von Partikelgrößenverteilung und Partikelform an Hand von drei Sandproben; Retsch Technology
- FGSV (2000): Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1
- FGSV (2007): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004/Fassung 2007
- FGSV (2010): Praxisinformationen der Arbeitsgruppe 6 „Gesteinskörnungen Ungebundene Bauweisen“, Fall 3: Anwendung des Fließkoeffizienten für den Einsatzbereich Asphalt, Straße und Autobahn (02/2010), S. 108
- HÄSSELBARTH, W. (2004) : BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen, Forschungsbericht 266, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- HÖLZER, A. (2007): Bestimmung des Widerstandes, Auftriebs und Drehmoments und Simulation der Bewegung nichtsphärischer Partikel in laminaren und turbulenten Strömungen mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigt durch Zentrum für Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- KOLLENBERG, W. (2004): Technische Keramik, Vulkan-Verlag GmbH
- KUKIES, P. (2004): Bestimmung des Fließkoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen, Schlussbericht zum AP-Projekt Nr. 03 371/S7
- Retsch Technology (2007): Broschüre „Camsizer®“ Partikelmesstechnik mit digitaler Bildverarbeitung
- Retsch Technology (2010): Bedienungsanleitung/Handbuch, Korngrößenmesssystem „Camsizer®“
- Retsch Technology (2012): Seminarunterlagen „Moderne Methoden der Partikelmesstechnik in Theorie und Praxis“
- SCHULZE, P. M. (2007): Beschreibende Statistik, 6. Auflage, Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH
- STIEß, M. (2009): Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage
- TROGISCH, H. (2003): Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 18
- WADELL, H. (1935): Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles, Journal of Geology 43, S. 250-280
- WAGNER, S. (2010): Bestimmung der Symmetrie von 3d-Modellen mit Hilfe der Partikelschwarmoptimierung, Technische Universität Chemnitz
- WÖRNER, T., STÜTZ, M., WESTINER, E. (2008): Ersatz des Brechsand/Natursand-Verhältnisses durch den Fließkoeffizienten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik , Heft 1009
- WÖRNER, T., NEIDINGER, S., WESTINER, E. (2012): Granulometrische Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen, Schlussbericht zum FE 06. 091 2010/DGB

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

### 2004

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System  
€ 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues  
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen  
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

### 2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren  
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

### 2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt  
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben  
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt  
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund  
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

### 2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen  
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen  
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

### 2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise  
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

### 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmeßmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

- S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50
- S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50
- S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50
- S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00
- S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)  
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00
- S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus  
Freudenstein, Birmann € 14,00

## 2011

- S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen  
Breitenbücher, Youn € 14,50
- S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Canzler, Winkler € 16,50
- S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt  
Ripke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50
- S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen  
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de](http://bast.opus.hbz-nrw.de) heruntergeladen werden.  
Jansen, Kurz € 16,00
- S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00
- S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen  
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00
- S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

## 2012

- S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

- S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen  
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50
- S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50
- S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung  
Durner € 16,50
- S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren  
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

## 2013

- S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung  
Ripke € 9,00
- S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50
- S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts  
Durner € 15,00

## 2014

- S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn  
Durner € 17,00
- S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen  
Maerschalk, Oertelt € 19,00
- S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
28195 Bremen  
Tel. (0421) 3 69 03-53  
Fax (0421) 3 69 03-48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.