



# Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bauingenieurwesen  
Institut für Straßenwesen  
und Eisenbahnbau  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Krass



## „Gezielte Herstellung von Brechsand zur Verwendung im Asphalt- und Betonbau“

### Schlussbericht

**Forschungsstelle:** Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau  
Ruhr-Universität Bochum (RUB)

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. K. Krass

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. H. Trogisch

**Auftraggeber:** Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs-  
vereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF)  
AiF-Forschungsprojekt-Nr. 12819 N/1

Dieses AiF-Vorhaben ist aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft  
und Technologie gefördert worden.

Bochum, im März 2003

## Zusammenfassung

Zur Zeit werden im Betonbereich von der Naturstein-Industrie ca. 30 Mio. t Betonzuschlag eingesetzt, allerdings fast ausnahmslos nicht im Sandbereich, der in einer üblichen Betonzusammensetzung im Mittel 30 bis 40 % ausmacht. Zur Herstellung von Asphalt werden pro Jahr über 20 Mio t Sande benötigt. Der Anteil der Brechsande liegt z. Zt. bei etwa 50 %. Er ließe sich – geeignete Qualität vorausgesetzt – deutlich steigern.

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurden durch verschiedene Aufbereitungsmechanismen mit einem Vertikalprallbrecher aus drei Gesteinsprovenienzen (Grauwacke, Basalt und Kalkstein) jeweils fünf granulometrisch unterscheidbare Brechsande hergestellt und gekennzeichnet. Anschließend wurden die Einflüsse der Differenzen der Brechsandgranulometrien auf die Eigenschaften der damit hergestellten Asphalte und Betone analysiert. Neben mechanischen Sandprüfungen wurden photooptische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Sande herangezogen, wobei die statistischen Längen von Partikelprojektionsflächen bestimmt wurden. Neben der Ermittlung der volumetrischen Korngrößenverteilungen wurden durch Kombination dieser Längen Partikelformparameter (= Kornformparameter) definiert, um damit verschiedene Formeigenschaften der Brechsande beschreiben zu können. Mit den verwendeten Kornformparametern sollten Formeigenschaften wie Kreisförmigkeit und Gedrungenheit beschrieben werden.

Die photooptische Untersuchungsmethode lieferte deutlich bessere Ergebnisse zur Prognostizierung der Asphalteigenschaften als die mechanischen Eigenschaften der Brechsande. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Variation der Kornform der Brechsande einen größeren Einfluss auf die Asphalteigenschaften ausübt als die Variation der Korngrößenverteilung. Die maximalen Korrelationen zu den Asphalteigenschaften werden mit einer Ausnahme ausschließlich durch Kornformparameter erreicht.

Die Untersuchungen ergaben, dass verschiedene Asphalteigenschaften von unterschiedlichen Kornformparametern primär beeinflusst werden. So ist es möglich, Brechsande aus derselben Provenienz durch die photooptisch ermittelten Kornformparameter sinnvoll zu unterscheiden, um dadurch die Auswirkungen auf Asphalteigenschaften beschreiben zu können.

Im Unterschied zu den im Asphalt verwendeten Brechsanden wurden die Sande für die Betonherstellung mit dem produktionsbedingten Überkornanteil und in jeweils verschiedenen Anteilen den Betonrezepturen zugegeben, um dabei eine möglichst ähnliche Korngrößenverteilung wie bei der Standardrezeptur mit Natursand zu erreichen. Eine statistische Auswertung des Zusammenhangs zwischen Sand- und Betoneigenschaften war daher nicht möglich. Der Beton mit Natursand hat erwartungsgemäß das geringste Verdichtungsmaß und damit die günstigste Konsistenz im Vergleich zu allen untersuchten Brechsanden. Bei der Verarbeitung der Betone mit Brechsand war auffällig, dass sie ein ausgeprägt thixotropes Verhalten zeigten, so dass sie sich trotz ihrer sehr steifen Konsistenz im Ruhezustand gut verdichten ließen. Die ermittelten Festigkeiten der Betone, die mit Brechsand hergestellt wurden, sind tendenziell höher als die der Betone mit Standardrezeptur. Eine Abhängigkeit der Art der Aufbereitung der Sande von den Frisch- und Festbetoneigenschaften konnte jedoch statistisch nicht nachgewiesen werden.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen können bei der Herstellung von Brechsanden für Asphalte dazu verwendet werden, gezielt solche Kornformen für Brechsande herzustellen, die die Asphalteigenschaften insbesondere bezüglich des Verformungswiderstandes positiv beeinflussen. Für den Einsatz in Beton sind die Ergebnisse noch nicht so eindeutig. Insgesamt wird durch die Untersuchungen ein Weg aufgezeigt, wie die Qualität von Brechsanden gesteigert und damit auch die Wettbewerbssituation der Steinbruchbetreiber (kmU) verbessert werden kann.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## **Vorwort**

Das vorliegende Vorhaben wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Die Initiative zu dieser Arbeit ging vom Bundesverband Naturstein-Industrie aus, über dessen Forschungsgemeinschaft Naturstein-Industrie e.V. der Antrag bei der AiF eingereicht worden war.

Die Betonuntersuchungen wurden im Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken durchgeführt.

Allen Beteiligten an diese Vorhaben sei dafür herzlich gedankt.

Prof. Dr.-Ing. Prof. Klaus Krass

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
<b>2</b>	<b>Untersuchungsprogramm</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Untersuchungsmaterialien</b>	<b>5</b>
3.1	Verwendete Gesteine	5
3.2	Asphaltkomponenten und Asphaltrezepturen	8
3.3	Betonkomponenten und Betonrezepturen	12
<b>4</b>	<b>Untersuchungsverfahren</b>	<b>20</b>
4.1	Mechanische Prüfungen der Sande	20
4.2	Photooptische Untersuchungen an den Sanden	20
4.3	Untersuchungen an Asphalt	24
4.4	Untersuchungen an Beton	25
<b>5</b>	<b>Statistische Methoden zur Beurteilung der Ergebnisse</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Sanduntersuchungen</b>	<b>28</b>
6.1	Ergebnisse der Untersuchungen an den Sanden zur Verwendung in Asphalt	28
6.1.1	Mechanische Eigenschaften der Sande	28
6.1.2	Ergebnisse der photooptischen Sanduntersuchungen	30
6.2	Ergebnisse der Untersuchungen an den Sanden zur Verwendung in Beton	49
6.2.1	Mechanische Eigenschaften des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande	49
6.2.2	Ergebnisse der photooptischen Untersuchungen	52
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Asphaltuntersuchungen</b>	<b>67</b>
7.1	Hohlraumgehalt und fiktiver Hohlraumgehalt	67
7.2	Verformungswiderstand	71
7.3	Verdichtungswiderstand der Asphalte	74
7.4	Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphaltbetone	76
7.5	Stabilität und Fließwert der Asphaltbetone	78
<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Betonuntersuchungen</b>	<b>81</b>
8.1	Frischbetoneigenschaften	81
8.2	Festbetoneigenschaften	82
<b>9</b>	<b>Funktionaler Zusammenhang zwischen Brechsand- und Asphalteigenschaften</b>	<b>84</b>
9.1	Fiktiver Hohlraumgehalt	84

9.2	Verformungswiderstand	88
9.2.1	Dehnung nach 10 kLW bzw. 4 kLW	88
9.2.2	Dehnungsrate der Asphalte	93
9.3	Verdichtungswiderstand der Asphalte	97
9.4	Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphalte	102
9.5	Stabilität und Fließwert der Asphaltbetone	106
<b>10</b>	<b>Beurteilung der Ergebnisse</b>	<b>109</b>
10.1	Grauwacke- und Basaltbrechsande zur Verwendung in Asphalt	109
10.2	Asphalteigenschaften und funktionale Zusammenhänge mit den Brechsandeigenschaften	110
10.3	Natursand, Kalkstein- und Basaltbrechsande zur Verwendung in Beton	113
10.4	Auswirkungen der Sande in Beton	115
<b>11</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>119</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>121</b>
<b>13</b>	<b>Literatur</b>	<b>123</b>
<b>14</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>126</b>
14.1	Tabellenverzeichnis	126
14.2	Abbildungsverzeichnis	129
	<b>Anhänge</b>	<b>133</b>

## Abkürzungen

$\delta$	Korngrößendefinition
$\varepsilon_w^*$	Dehnungsrate (einaxialer Druckschwellversuch)
$\varepsilon_4, \varepsilon_{10}$	Dehnung nach 4 bzw. 10 kLW
AB	Asphaltbeton
$A_{KM}$	Abrieb in der Kugelmühle
ANOVA	Rechenalgorithmus zur Bestimmung eines Korrelationskoeffizienten
CCD	Charge Couple Device
CPA	Computergestützte Partikelanalyse
$d_{\ddot{A}}$	Äquivalentdurchmesser
df	Anzahl der Freiheitsgrade
$d_F$	Feret-Durchmesser
F	F-Wert der F-Verteilung
$F_{Kon}$	Konkavität
$F_{Kub}$	Kubizität
$F_S$	Sphärizität
FG	Feinheitsgrad
FZ	Fließzahl
G	Gestein
kLW	Kilo-Lastwechsel (= 1000 Lastwechsel)
MG	Mischgut
n	Kornklasse
pho	photooptisch
QKA	Kornanzahlquotient
r	Korrelationskoeffizient
$r_p$	partieller Korrelationskoeffizient
RRSBn	Streuungsparameter der RRSB-Verteilung
sig T	Fehlertsignifikanz
SMA	Splittmastixasphalt
SZA	Spaltzugfestigkeitsabfall
Var	Regressionsvariable
$Var_{abh}$	abhängige Regressionsvariable
$Var_k$	Kontrollvariable (bei partieller Korrelationsanalyse)
VPB	Vertikalprallbrecher

# **1 Einleitung**

## **1.1 Problemstellung**

Asphalt- und Betonindustrie benötigen große Mengen an hochwertigem Brechsand und Splitt. Für anspruchsvolle Einsatzgebiete, insbesondere im Asphalt, werden Edelbrechsande 0/2 mm und Edelsplitt gefordert.

Zur Zeit werden von der Naturstein-Industrie ca. 30 Mio. t Betonzuschlag geliefert, allerdings fast ausnahmslos nicht im Sandbereich, der in einer üblichen Betonzusammensetzung im Mittel 30 bis 40 % ausmacht. Zur Herstellung von Asphalt werden pro Jahr über 20 Mio t Sande benötigt. Der Anteil der Brechsande liegt z. Zt. bei etwa 50 %.

Anforderungen an die Granulometrie von Sanden gibt es vor allem bezüglich ihres Überkornanteils [1] [2]. Obwohl in der Vergangenheit immer wieder Anstrengungen unternommen wurden, gibt es bisher keine Anforderungen an die Kornform von Brechsanden [3] [4].

Splitt werden immer noch überwiegend unter Verwendung von Kegelbrechern hergestellt [5]. Dabei wird das aufzubereitende Material bei fester Brechereinstellung zwischen Brechmantel und Brechkegel zerquetscht, wodurch sich Kornformen erzielen lassen, die für die Verwendung im Asphalt- und Betonbau geeignet sind. Dies trifft aber zum großen Teil nur für die Körnungen zu, die bezüglich ihrer Größe nahe der Brechereinstellung liegen. Je größer der Unterschied zwischen Korngröße und Brechereinstellung wird, desto schlechter (plattiger bzw. stengeliger) werden die Kornformen und desto unbrauchbarer die anfallenden Körnungen. Legt man also Wert auf die Herstellung eines hochwertigen Splitts, um die vorgenannten Anforderungen einzuhalten, so weisen die dann anfallenden feinkörnigen Brechsande unbefriedigende Kornformen auf, oft verbunden mit schwankenden Fülleranteilen. Das Ergebnis sind große Mengen an feinkörnigen Mineralstoffen (Brechsanden), die kaum oder gar nicht verwertbar sind. Es muss daher ein Ziel sein, die anfallenden Gesteine in einer Weise aufzubereiten, dass auf der ganzen Bandbreite der üblichen Lieferkörnungen wirtschaftlich und technisch weiterverarbeitbare Produkte entstehen. Dazu ist es aber notwendig, den Einfluss von Kornform und Korngrößenverteilung im Brechsandbereich auf Asphalt- und Betoneigenschaften zu quantifizieren und daraus Zielgrößen zu erarbeiten, die als Grundlage für die Brechsandproduktion verwendet werden können.

## **1.2 Zielsetzung**

Durch verschiedene Aufbereitungsmechanismen sollen granulometrisch zu unterscheidende Brechsande hergestellt werden.

Zur gezielten Brechsandherstellung werden heute hauptsächlich folgende Brechwerkzeuge [6] eingesetzt: Kugel- und Stabrohrmühlen-, Hammermühlen und -brecher sowie Rotormühlen und -brecher. Aufgrund des geringeren Verschleißes, kombiniert mit höheren Durchsatzraten und geringerem spezifischen Energieverbrauch, geht der Trend in den Aufbereitungsanlagen immer mehr zum Einsatz von Rotormühlen und -brechern [7]. Daher kamen diese Aufbereitungsmethoden bei diesem Vorhaben in die engere Wahl. Ein zu dieser Gruppe gehörender Brechertyp ist der Vertikalprallbrecher. Für diesen bestehen auch bereits Erfahrungen in der wirtschaftlich sinnvollen Produktion von gedrungenen möglichst kubischen Brechsanden [8] [9]. Die Aufgabe war daher, zunächst Brechsande herzustellen, die eine gewisse Bandbreite ihrer jeweiligen Eigenschaften erwarten lassen. Diese Möglichkeit ist bei einem autogenen Vertikalprallbrecher gegeben [10].

Ziel der anschließenden Untersuchungen war es, auf der einen Seite granulometrische Eigenschaften der untersuchten Brechsande zu finden, die es ermöglichen, den Natursand in Standardbetonrezepturen durch diese zu ersetzen, ohne dabei einen Qualitätsverlust der hergestellten Betone oder eine Verteuerung durch höhere Zementgehalte in Kauf nehmen zu müssen. Auf der anderen Seite sollte der Einfluss der granulomerischen Eigenschaften der untersuchten Brechsande insbesondere auf die Asphalteigenschaft Verformungswiderstand quantifiziert werden.



## 2 Untersuchungsprogramm

Im Fließschema in **Abbildung 2-1** wird der Ablauf der durchgeführten Untersuchungen dargestellt.

Im ersten Schritt erfolgte die Aufbereitung der für die Untersuchungen ausgewählten Mineralstoffe. Daran schlossen sich die Untersuchungen der hergestellten Mineralstoffkörnungen an, die sich vertieft mit der Kennzeichnung der untersuchten Brechsande befassten.

Bei den anwendungsbezogenen Untersuchungen erfolgte ein unterschiedliches Vorgehen bei Asphalt und Beton. Dabei wurden die Betonuntersuchungen vom Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken durchgeführt.

Die Untersuchungen an den Brechsanden für die Asphaltherstellung erfolgten an einer definierten Kornklasse. Darüber hinaus wurde jeder Asphaltart der gleiche Massenanteil an Brechsand zugegeben.

Die Brechsande für die Betonherstellung wurden mit dem produktionsbedingten Überkornanteil und in jeweils verschiedenen Anteilen den Betonrezepturen zugegeben. Dabei sollte eine möglichst ähnliche Kornverteilung wie bei der Standardrezeptur erreicht werden.

Aus diesen Gründen erfolgte die numerische Auswertung der Zusammenhänge zwischen Sand und anwendungsbezogenen Untersuchungen nur für die Asphaltuntersuchungen. Die Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Beton- und Sanduntersuchungen erfolgte qualitativ.

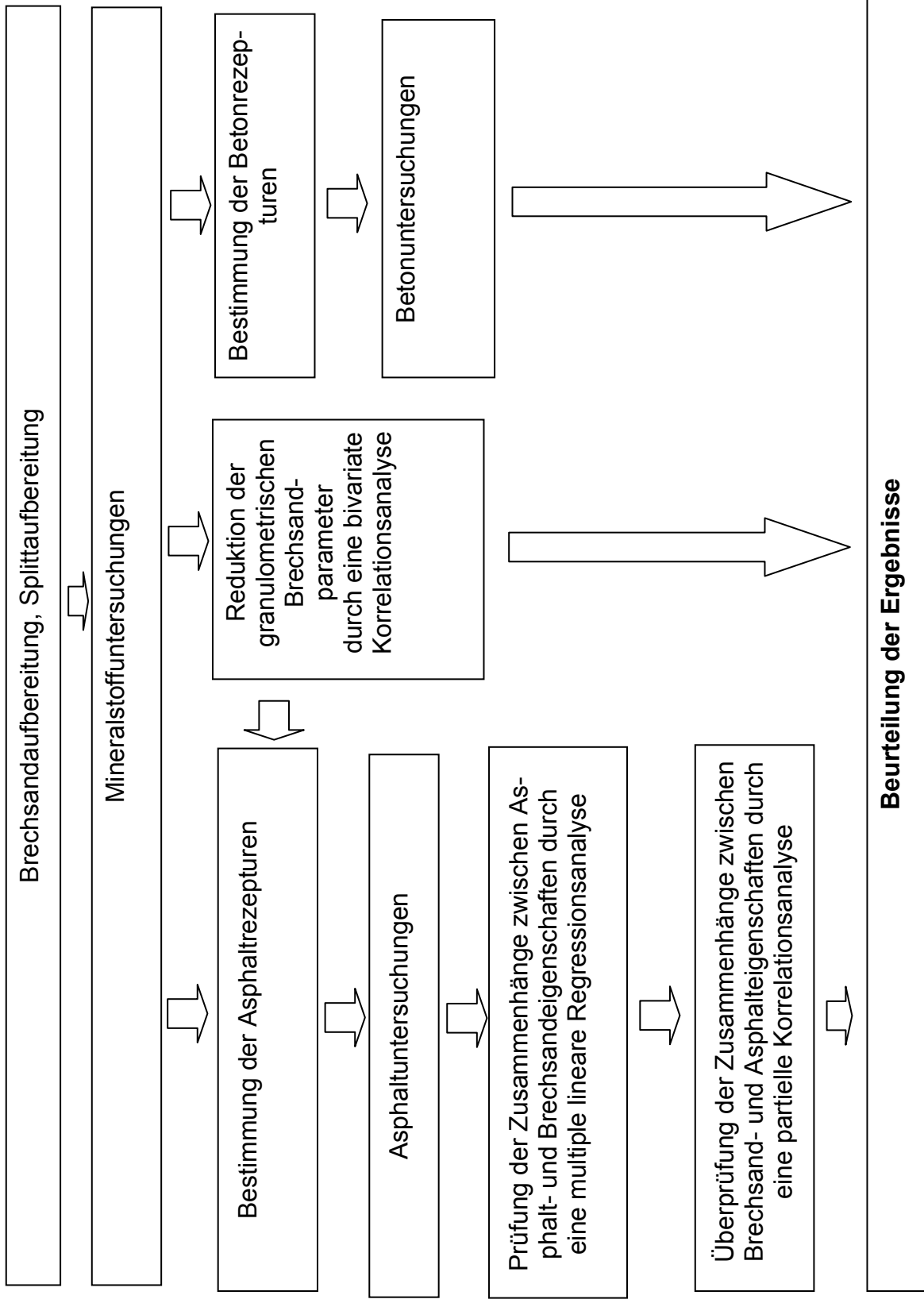


Abbildung 2-1: Fließschema der durchgeführten Untersuchungen

### 3 Untersuchungsmaterialien

#### 3.1 Verwendete Gesteine

Als Ausgangsmaterial für die Untersuchungen wurden bautechnisch relevante Vertreter der magmatischen und sedimentären Gesteine verwendet. Als magmatisches Gestein wurden Basalt und als sedimentäre Gesteine Grauwacke für den Einsatz in Asphalt sowie Kalkstein als Betonzuschlag gewählt. Als Aufgabegut wurde die Körnung 8/16 mm, die meistens bei der Aufbereitung im Überschuss anfällt, verwendet.

Durch Variation der Geräteparameter des Vertikalprallbrechers wurden acht granulometrisch zu unterscheidende Brechsande hergestellt. Variiert wurden die Siebweite am Brecherausgang (Trennschnitt) und der Anteil des Kaskadenstroms.

Durch diese Variationsmöglichkeiten ist die Zusammensetzung der Kornwolke im Brechraum steuerbar, denn diese hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Endprodukts. Große, mit hoher kinetischer Energie geladene Körner teilen beim Zusammenstoß mit kleineren, energieärmeren Körnern schwere Schläge aus, die eine schnelle Zerkleinerung zur Folge haben. Die kleinsten Körner und der Staub bewegen sich trotz sehr geringer kinetischer Energie sehr schnell fort und wirken wie ein Sandstrahlgebläse auf alles, was mit ihnen in Berührung kommt (Sandstrahlung, Rollierung).

Durch die Veränderung des Anteils des Kaskadenstroms und des Trennschnitts werden die Korngrößenverteilung und die Kornform der Kornwolke im Brechraum und die des Endproduktes beeinflusst.

Mit der Zielsetzung, eine möglichst große Bandbreite an Brechsandeigenschaften zu erhalten, erfolgte die Brechereinstellung durch Variation

- des Trennschnittes (2 mm; 8 mm) und
- des Kaskadenstroms (0 M.-%; 40 M.-%).

Der Trennschnitt bei 2 mm erfolgte durch einen Siebboden mit einer Maschenweite von 2,5 x 5 mm, der bei 8 mm mit 9 x 9 mm. Kleinere Siebmaschenweiten führten unmittelbar zum Zusetzen des Siebes.

Durch eine Änderung der Rotorgeschwindigkeit ändert sich die Rotoraustrittsgeschwindigkeit der Gesteinskörner. Die Korngrößenreduzierung des Brecherdurchsatzes steigt mit zunehmender Rotorgeschwindigkeit.

Die Rotorgeschwindigkeit wird gesteinspezifisch konstant gehalten, da sie maßgeblich die Zerkleinerungswirkung insgesamt bestimmt, was nicht Gegenstand der Untersuchungen ist. Sie wurde so eingestellt, dass sich ein gesteinspezifisch optimaler

Durchsatz des Brechers einstellte. In **Tabelle 3-1** sind die Durchsätze und die dabei beanspruchte Stromstärke des Brechers im Kreislauf zusammengefasst.

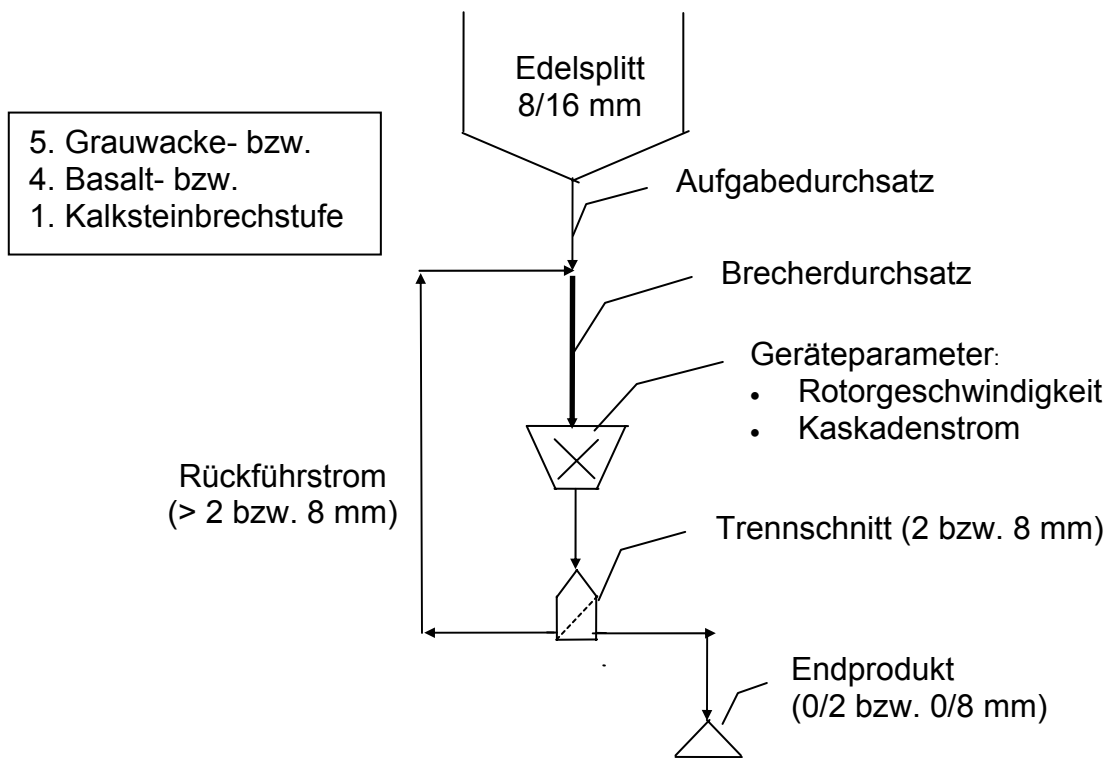
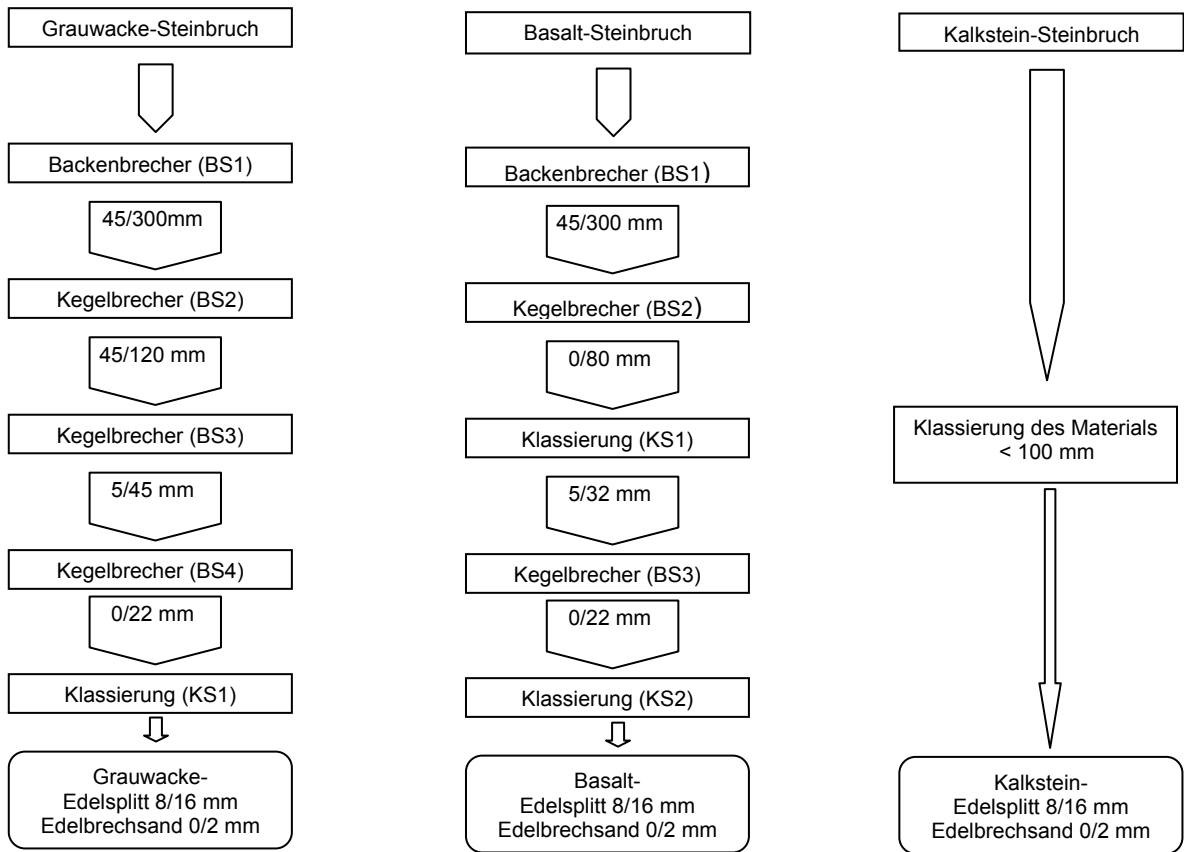
**Tabelle 3-1: Leistung der Brechsandaufbereitung mit Vertikalprallbrecher und Stromaufnahme**

Gestein	Grauwacke				Basalt				Kalkstein			
Bezeichnung	G02K	G02oK	G08K	G08oK	B02K	B02oK	B08K	B08oK	K02K	K02oK	K08K	K08oK
Brecher-aufgabe [t/h]	2	3	4,5	4	2,5	2,5	3,5	3,5	5	4	4	4,5
Rückführ-strom [t/h]	18	11,5	8,5	4	19,5	9,5	8,5	5,5	13	6	7	4,5
End-produkt [t/h]	2	3	4,5	4	2,5	2,5	3,5	3,5	5	4	4	4,5
Stromauf-nahme [A]	23	24	23	20	27	23	20	22	19,5	24	15	16

Außerdem wurde für die Gesteinsarten Grauwacke und Basalt jeweils ein Brechsand konventionell mit Kegeltbrecher, für Kalkstein allein durch Klassierung, hergestellt. Somit standen jeweils fünf in der Granulometrie unterscheidbare Grauwacke-, Basalt- und Kalksteinbrechsande zur Verfügung. Die Aufbereitung von der Vorbrechstufe bis zur Bereitstellung zur Siebung wird im Folgenden erläutert und in **Abbildung 3-1** graphisch dargestellt: Die Eingabe in eine Aufbereitungsstufe entsteht durch die Ausgabe aus der vorangegangenen Stufe zuzüglich einer Absiebung des Materials.

Jeweils ein Edelbrechsand aus Grauwacke- und Basaltaufbereitung wurde aus Klassierungsstufe 1 (Grauwacke) bzw. Klassierungsstufe 2 (Basalt) erhalten. Die Brechsande erhielten die Bezeichnung G02 (Grauwackebrechsand ohne 5. Brechstufe) und B02 (Basaltbrechsand ohne 4. Brechstufe). Der Brechsand K02 entstand durch Klassierung des Steinbruchmaterials < 100 mm. Weitere acht Brechsande entstanden durch Hinzuschalten des autogenen Vertikalprallbrechers als vierte bzw. fünfte Brechstufe. Die Sande wurden dann entsprechend der Geräteparameter, die zu ihrer Herstellung verwendet wurden, bezeichnet.

In **Tabelle 3-2** sind die Aufbereitungsbereitungsmechanismen, die zur Herstellung der Brechsande führten, aufgeführt und den entsprechenden Brechsandbezeichnungen zugeordnet.



**Abbildung 3-1: Aufbereitungsstufen der Brechsandherstellung**

Tabelle 3-2: Letzte Brechstufe zur Herstellung der Brechsande

Gestein		Grauwacke				
Bezeichnung		G02	G02K	G02oK	G08K	G08oK
Kegelbrecher		X				
VP-Brecher	Ohne Kaskade			X		X
	40 M.-% Kaskade		X		X	
	Trennschnitt: 2 mm		X	X		
	Trennschnitt: 8 mm				X	X
Gestein		Basalt				
Bezeichnung		B02	B02K	B02oK	B08K	B08oK
Kegelbrecher		X				X
VP-Brecher	Ohne Kaskade			X		
	40 M.-% Kaskade		X		X	
	Trennschnitt: 2 mm		X	X		
	Trennschnitt: 8 mm				X	
Gestein		Kalkstein				
Bezeichnung		K02	K02K	K02oK	K08K	K08oK
Klassierung		x				
VP-Brecher	Ohne Kaskade			X		X
	40 M.-% Kaskade		X		X	
	Trennschnitt: 2 mm		X	X		
	Trennschnitt: 8 mm				X	X

### 3.2 Asphaltkomponenten und Asphaltrezepturen

Im Splittbereich wurde bei den Asphalten immer Basaltdedelsplitt nach TL Min-StB [2] in den Lieferkörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 mm verwendet. Der Gewinnungsort des Basaltdedelsplitts und des Basaltdedelbrechsands ist identisch. Die Lieferkörnungen wurden vollständig mittels Nasssiebung von Über- und Unterkorn befreit.

Um die Variation der Brechsande isoliert betrachten zu können, wurde in allen Asphalten Kalksteinmehl als Fremdfüller im Bereich < 0,09 mm eingesetzt. Die Eigenschaften des Kalksteinmehls sind in **Tabelle 3-3** zusammengefasst.

Als Asphalte wurden die häufig verwendeten Asphaltarten Asphaltbeton 0/11 S und Splittmastixasphalt 0/11 S verwendet. Die Mischgutzusammensetzung erfolgte jeweils entsprechend den Vorgaben der ZTV Asphalt-StB [11]. Dabei war das Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt [12] zu beachten. Dieses sieht vor, die Mineralstoffe nach volumetrischen Gesichtspunkten zusammenzusetzen, wenn sich die Rohdichten der am Mischgut beteiligten Mineralstoffe wesentlich voneinander unter-

scheiden. Gemäß ZTV Asphalt-StB kann der Bindemittelgehalt gegenüber den darin vorgeschriebenen Grenzwerten reduziert werden, wenn die Rohdichte des Mineralstoffgemisches den Wert von  $2,8 \text{ g/cm}^3$  überschreitet. Die Mischgutzusammensetzung konnte also volumetrisch vorgenommen werden.

**Tabelle 3-3: Eigenschaften des verwendeten Kalksteinmehls**

Merkmal		Dimension	Eigenschaft des verwendeten Füllers
Rohdichte		[g/cm <sup>3</sup> ]	2,757
Korngrößenverteilung	< 0,09 mm	[M.-%]	92,9
	< 0,063 mm		85,7
	< 0,032 mm		52,4
Hohlraumgehalt nach Rigden		[Vol.-%]	35,5
Versteifende Eigenschaften	Stabilisierungsindex	[-]	68/32
	Δ R. u. K.	[°C]	18,0
Spezifische Oberfläche nach Blaine		[m <sup>2</sup> /g]	0,313

**Tabelle 3-4** enthält die für die volumetrische Bestimmung der Mischgutzusammensetzung relevanten gemäß DIN 52102 [13] bestimmten Rohdichten. Die angegebene Rohdichte des Bindemittels entspricht der Herstellerangabe. Neben den Vorgaben der ZTV Asphalt-StB [11] wurde ein möglichst großer Sandgehalt angestrebt, um dessen Einfluss auf die Asphalteeigenschaften deutlich zu machen.

**Tabelle 3-4: Rohdichten der im Asphalt verwendeten Baustoffe**

Material	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
Splitt 2/5; 5/8; 8/11 mm aus Basalt	3,050
Brechsand 0,09/2 mm aus Basalt	
Brechsand 0,09/2 mm aus Grauwacke	2,723
Füller (Kalksteinmehl)	2,757
Mineralstoffgemisch für Asphaltbeton mit Grauwackebrechsand	2,890
Mineralstoffgemisch für Asphaltbeton mit Basaltbrechsand	3,021
Mineralstoffgemisch für Splittmastixasphalt mit Grauwackebrechsand	2,965
Mineralstoffgemisch für Splittmastixasphalt mit Basaltbrechsand	3,021
Bitumen 50/70	1,022
Stabilisierender Zusatz (Zellstoff)	Wird dem Bindemittel zugerechnet

Die volumetrisch berechneten Sieblinien der Mineralstoffgemische für die beiden Asphalte sind in **Tabelle 3-5** angegeben sowie in den **Abbildungen 3-2** und **3-3** graphisch dargestellt. Die gravimetrischen Zugabeanteile der Lieferkörnungen am Mineralstoffgemisch sind in **Tabelle 3-6** aufgeführt.

**Tabelle 3-5: Volumetrisch berechnete Anteile in den Mineralstoffgemischen für die beiden Asphalte**

Kornklasse	Asphaltbeton 0/11 S	Splittmastixasphalt 0/11 S
[mm]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
< 0,09	9,3	9,3
< 2	50	27
< 5	70	40
< 8	85	60
< 11,2	100	100

**Tabelle 3-6: Gravimetrische Zugabeanteile in den Mineralstoffgemischen für die beiden Asphalte**

Kornklasse	AB 0/11 S		SMA 0/11 S	
	mit Grauwacke-Brechsand	mit Basalt-Brechsand	mit Grauwacke-Brechsand	mit Basalt-Brechsand
mm	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
< 0,09	9,5	9,1	9,3	9,1
0,09/2	37,7	40,4	15,6	17,2
2/5	20,1	19,2	12,3	12,1
5/8	15,8	15,1	19,5	19,2
8/11	16,9	16,2	43,3	42,4

Die zur Ermittlung des optimalen Bindemittelgehaltes verwendeten Bindemittelgehalte sind **Tabelle 3-7** zu entnehmen. Dem Mischgut für Splittmastixasphalt wurden jeweils 0,3 M.-% Zellstoff als stabilisierender Zusatz hinzu gegeben.

**Tabelle 3-7: Gravimetrische Bindemittelgehalte der Asphalte**

AB 0/11 S mit Grauwacke-Brechsand	AB 0/11 S mit Basalt-Brechsand	SMA 0/11 S mit Grauwacke-Brechsand	SMA 0/11 S mit Basalt-Brechsand
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
6,5	6,5	7,0	7,0
5,9	5,9	6,5	6,5
5,6	5,6	6,1	6,0
		5,8	



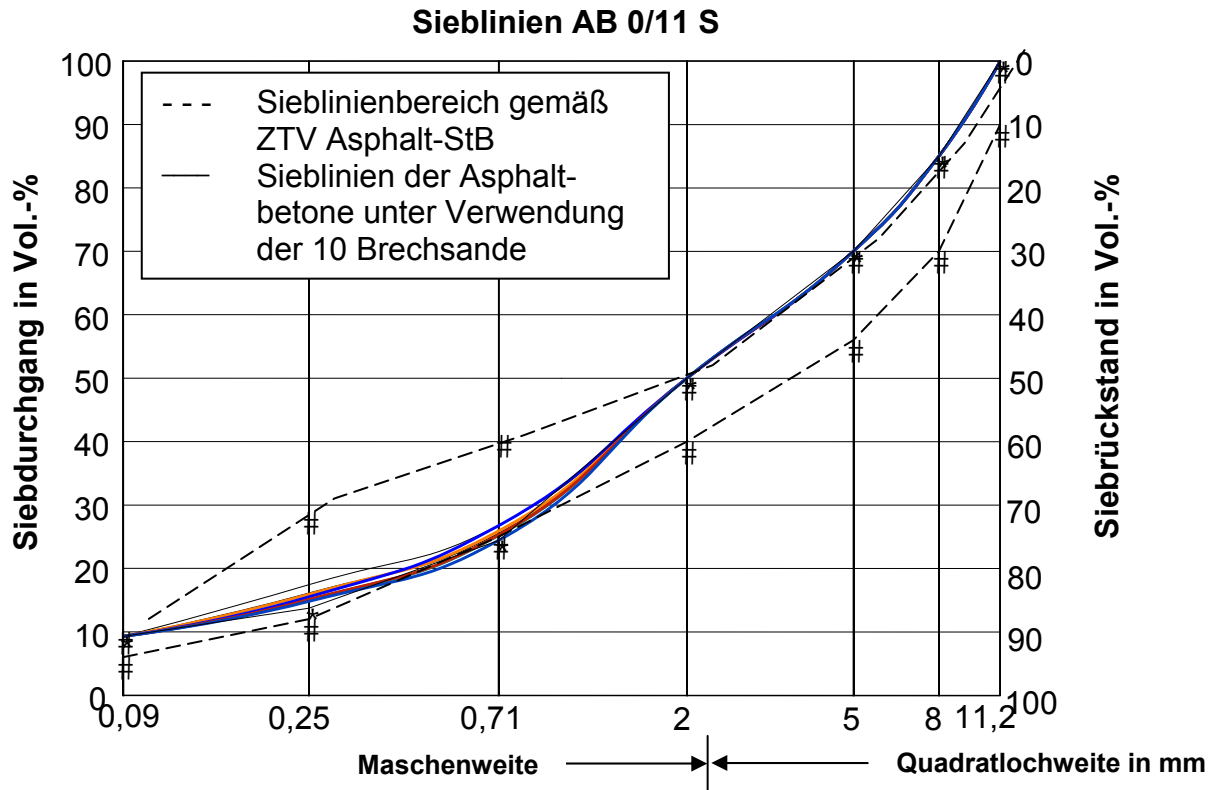


Abbildung 3-2: Sieblinien der Asphaltbetone 0/11 S

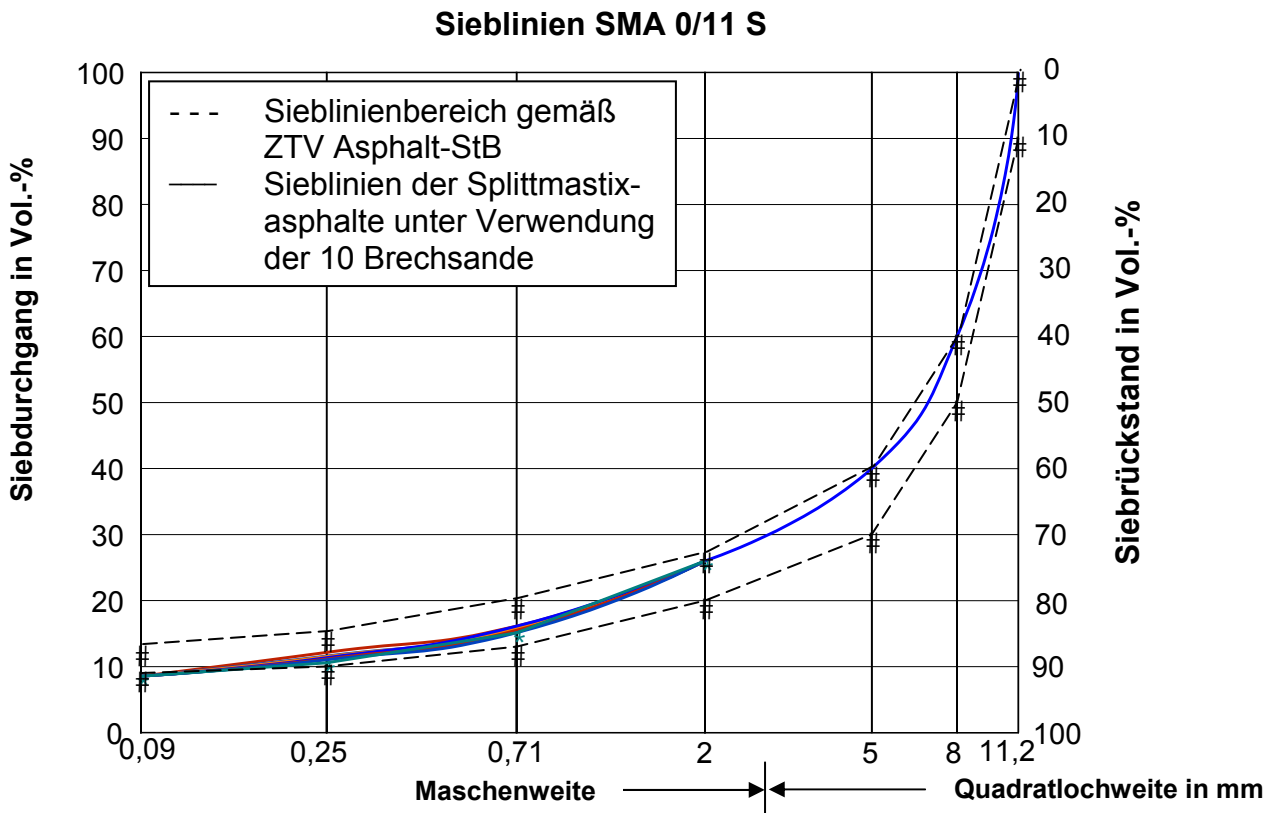


Abbildung 3-3: Sieblinien der Splittmastixasphalte 0/11 S

Für die Untersuchungen des Verformungswiderstands und der Spaltzugfestigkeit sowie für die Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Brechsand- und Asphalteeigenschaften wurden nur Asphalte mit optimalem Bindemittelgehalt verwendet. Als optimal wurden Bindemittelgehalte interpretiert, wenn durch die Marshall-Verdichtung ein minimaler fiktiver Hohlraumgehalt des Mineralstoffgemisches des Asphaltes erzielt wurde [14] und für die Asphalte die Anforderungen gemäß ZTV Asphalt-StB weitgehend erfüllt waren.

### 3.3 Betonkomponenten und Betonzepturen

Im Splittbereich der untersuchten Betone wurde der gleiche Basaltespalt wie bei den Asphalten, jedoch in den Lieferkörnungen 2/5, 5/8 und 8/16 mm verwendet. Als Natursand kam ein typischer Rheinsand zur Anwendung.

Um den Einfluss des Feinstanteiles < 0,063 mm auf die zu prüfenden Frisch- und Festbetoneigenschaften konstant zu halten, wurde bei allen Sanden der Anteil < 0,063 mm ausgewaschen, getrocknet und gewogen.

In **Tabelle 3-8** sind die Mehlkorneigenschaften der untersuchten Brechsande zusammengefasst.

**Tabelle 3-8: Eigenschaften des verwendeten Mehlkorns**

Mehlkorn von	Rohdichte	Anteil am Sand	Spezif. Oberfläche nach Blaine
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[M.-%]	[cm <sup>2</sup> /g]
NS		0,13	Nicht geprüft
K02K	2,669	11,4	2810
K02oK		7,5	3083
K08K		12,2	2994
K08oK		16,0	3113
K02		3,0	3182
B02K	3,050	13,69	2330
B02oK		16,88	2202
B08K		10,92	2064
B08oK		16,28	2136
B02		17,89	2211

Die Betone wurden gemäß DIN 1045 [15] aus dem Natursand bzw. Brechsand, dem Basaltespalt, Zement nach DIN EN 197-1 [16] und Wasser sowie Fließmittel hergestellt. Auf den Einsatz von Betonzusatzstoffen, wie Flugaschen oder Gesteinsmehlen zur Optimierung des Mehlkorngehalts der Betone, wurde bewusst verzichtet, um den

Unterschied zwischen Natursand, üblichem Brechsand und optimiertem Brechsand auf die betontechnologischen Eigenschaften nicht zu verwischen.

Für die hergestellten Betone B25 und B55 wurden die in **Tabelle 3-9** aufgeführten Randbedingungen gewählt.

**Tabelle 3-9: Allgemeine Randbedingungen für die Herstellung der Betone**

B25	B55
Standardrezeptur auf der Basis von Natursand/Splitt, Sieblinie A/B 16 CEM III/A 32,5 Verflüssiger/Fließmittel	Standardrezeptur auf der Basis von Natursand/Splitt, Sieblinie A/B 16 CEM III/A 42,5 Verflüssiger/Fließmittel
Austausch des Natursands im Kornbereich 0/2 mm durch herkömmlichen Brechsand	Austausch des Natursands im Kornbereich 0/2 mm durch herkömmlichen Brechsand
Austausch des herkömmlichen Brechsands durch die in der Kornform optimierten Brechsande	Austausch des herkömmlichen Brechsands durch den in der Kornform optimierten Brechsand

Auf der Grundlage dieser Vorgaben wurden die in **Tabelle 3-10** beschriebenen Betonrezepturen für die Vergleichsbetone verwendet.

Die Sieblinie entspricht unter Verwendung dieser Gesteinskörnungen dem Bereich A/B 16. Ursprünglich war vorgesehen, den Natursand zu gleichen Anteilen durch den zu prüfenden Brechsand auszutauschen. Die Korngrößenverteilung der Brechsande zeigte aber teilweise gegenüber dem Natursand so große Abweichungen, dass zur Einhaltung der Sieblinie A/B 16 Korrekturen vorgenommen werden mussten. Die mit dem Vertikalprallbrecher hergestellten Brechsande wiesen sehr hohe Anteile an Überkorn auf, insbesondere bei den Brechsanden, die ohne Kaskade hergestellt wurden. Im ungünstigsten Fall betrug der Anteil an Überkorn 30 M.-%. Der Anteil an Überkorn im Brechsand wurde daher nicht abgesiebt, sondern bei der Erstellung der Sieblinie berücksichtigt.

Dem Natursand am nächsten kommt hinsichtlich der Kornzusammensetzung der Brechsand aus devonischem Kalkstein herkömmlicher Aufbereitung.

Für den Wasseranspruch und die Verarbeitbarkeit ist neben der Kornform der Anteil an Mehlkorn im Anteil 0/2 mm von entscheidender Bedeutung. Um den Einfluss des Mehlkorngehalts auf die zu prüfenden Frisch- und Festbetoneigenschaften konstant

zu halten, wurde bei allen Sanden der Anteil  $< 63 \mu\text{m}$  ausgewaschen, getrocknet und gewogen. Diese Ergebnisse sind Abschnitt 3.2 zu entnehmen. Erwartungsgemäß sind die Gehalte an Mehlkorn in den Brechsanden höher als in dem durch Nassbaggerung gewonnenen Natursand. Beim konventionell hergestellten Basaltbrechsand liegen bereits sehr hohe Anteile an Feinanteilen vor. Im Gegensatz zum Kalkstein führt daher die Anwendung des Vertikalprallbrechers beim Basalt zu keiner weiteren Erhöhung des Anteils  $< 63 \mu\text{m}$ , im Gegenteil, die Gehalte sind bis zu 7 M.-% niedriger.

**Tabelle 3-10: Betonrezepturen für die Vergleichsbetone B25 und B55**

Bestandteile		B25	B55
CEM III/A 32,5	kg/m <sup>3</sup>	300	-
CEM III/A 42,5	kg/m <sup>3</sup>	-	380
Natursand	kg/m <sup>3</sup>	611,4	584,6
Basaltsplitt 2/5	kg/m <sup>3</sup>	340,7	325,7
Basaltsplitt 5/8	kg/m <sup>3</sup>	283,9	271,4
Basaltsplitt 8/16	kg/m <sup>3</sup>	662,4	633,3
$\Sigma$ Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1898,4	1815,0
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	165	170
w/z-Wert		0,55	0,45
Fließmittel	M.-%	0,45	0,45

Da der Feinanteil im Zuschlag in allen Rezepturen konstant bleiben sollte, wurde allen Brechsanden die im Natursand ermittelte Menge wieder zugesetzt. Die Betonrezepturen für alle B25 mit gleichen Anteilen  $< 63 \mu\text{m}$  enthält **Tabelle 3-11**.

Zusätzlich zum Untersuchungsprogramm wurden zwei Betone mit den Sanden B02oK und K08K im Originalzustand hergestellt, um die Auswirkungen der hohen Feinanteile in diesen Brechsanden auf die Betoneigenschaften zu untersuchen (s. **Tabelle 3-12**).

Zur Verringerung des Untersuchungsaufwands wurden nicht alle optimierten Brechsande, die durch die Brechversuche hergestellt wurden, in die Betonversuche einbezogen. Für den B55 erfolgte dies nur mit drei Brechsanden, siehe **Tabelle 3-13**, da erwartet wurde, dass sich die Unterschiede im Verarbeitungsverhalten aufgrund des höheren Zementgehalts bei diesem Beton nicht so stark auswirken wie beim B25.

**Tabelle 3-11: Betonrezepturen für B25**

Sandbezeichnung	K02K	K02oK	K08K	K08oK	K02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
CEM III/A 32,5	300									
kg/m³										
Brechsand	706,6	694,0	706,6	694,0	706,6	604,8	719,2	586,7	756,0	473,2
kg/m³										
Basaltspplitt 2/5	283,9	283,9	283,9	189,3	283,9	302,4	189,3	378,5	189,0	378,5
kg/m³										
Basaltspplitt 5/8	378,5	378,5	378,5	473,2	378,5	415,8	283,9	359,6	283,5	378,5
kg/m³										
Basaltspplitt 8/16	567,8	567,8	567,8	567,8	567,8	567,0	700,3	567,8	661,5	662,4
kg/m³										
Σ Gesteinskörnung	1936,8	1924,2	1936,8	1924,3	1936,8	1890,0	1892,7	1892,6	1890,0	1892,6
kg/m³										
Wasser	165									
kg/m³										
w/z-Wert	0,55									
M.-%										
Fließmittel	0,45									
M.-%										

**Tabelle 3-12: Zusätzliche Betonrezepturen für B25**

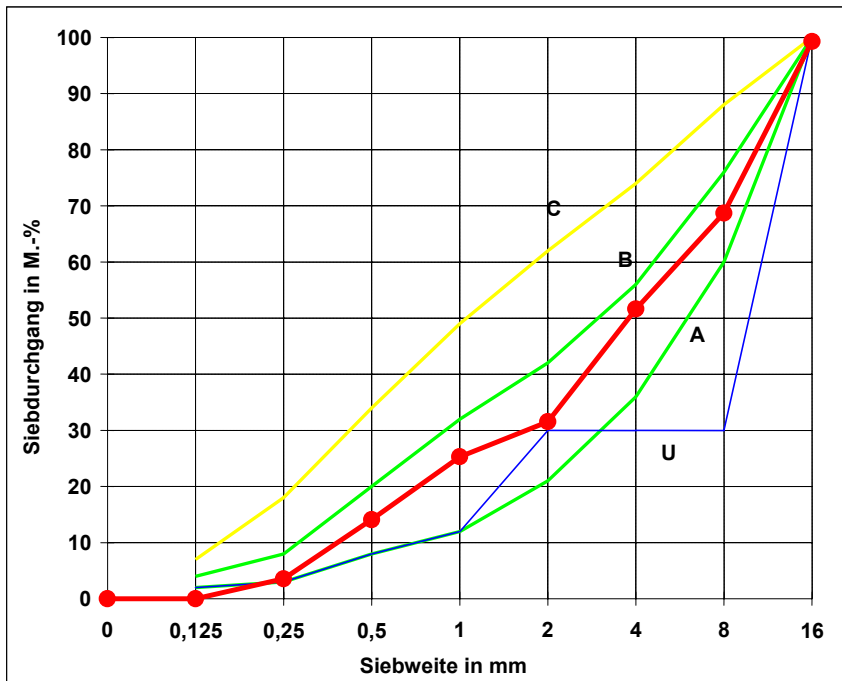
Sandbezeichnung		B02oK	K08K
CEM III/A 32,5	kg/m <sup>3</sup>	300	
Brechsand	kg/m <sup>3</sup>	719,2	706,6
Basaltsplitt 2/5	kg/m <sup>3</sup>	189,3	283,9
Basaltsplitt 5/8	kg/m <sup>3</sup>	283,9	378,5
Basaltsplitt 8/16	kg/m <sup>3</sup>	700,3	567,8
Σ Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1892,7	1936,8
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	165	
w/z-Wert	-	0,55	
Fließmittel	%	0,45	

**Tabelle 3-13: Betonrezepturen für B55**

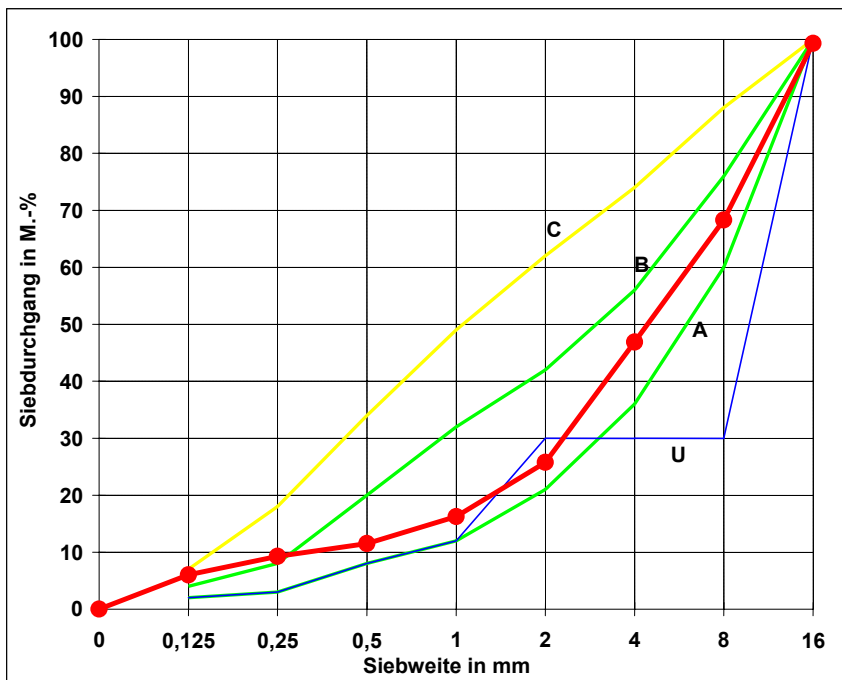
Sandbezeichnung		K02oK	B02	B02oK
CEM III/A 42,5	kg/m <sup>3</sup>	380		
Brechsand	kg/m <sup>3</sup>	663,5	452,4	561,0
Basaltsplitt 2/5	kg/m <sup>3</sup>	271,4	361,9	361,9
Basaltsplitt 5/8	kg/m <sup>3</sup>	361,9	361,9	343,8
Basaltsplitt 8/16	kg/m <sup>3</sup>	542,8	633,3	542,8
Σ Gesteinskörnung	kg/m <sup>3</sup>	1839,6	1809,5	1809,5
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	170		
w/z-Wert	-	0,45		
Fließmittel	%	0,45		

Im Folgenden sind beispielhaft fünf Sieblinien von Betonen B25 wiedergegeben. Die übrigen Sieblinien entsprechen in etwa den Beispielen in den **Abbildungen 3-4** und **3-5**, so dass auf ihre Wiedergabe verzichtet werden kann.

**Abbildung 3-4** zeigt die Sieblinie unter Verwendung von Natursand. Sie liegt, wie angestrebt, im Bereich zwischen A und B. Aufgrund des niedrigen Feinanteils liegt diese Sieblinie bei der Siebweite 0,125 allerdings im unteren Bereich. Die Sieblinie der Gesteinskörnung mit B02, also dem Basaltbrechsand konventioneller Aufbereitung, liegt ebenfalls im Bereich zwischen A und B (**Abbildung 3-5**), bei der Siebweite 0,25 mm aber bereits auf der Grenzlinie zwischen B und C und bei 0,125 mm oberhalb von B. Aufgrund des hohen Gehalts an Feinanteilen (17,9 M.-% < 63 µm) ist dies erklärlich.



**Abbildung 3-4: Sieblinie mit Natursand**

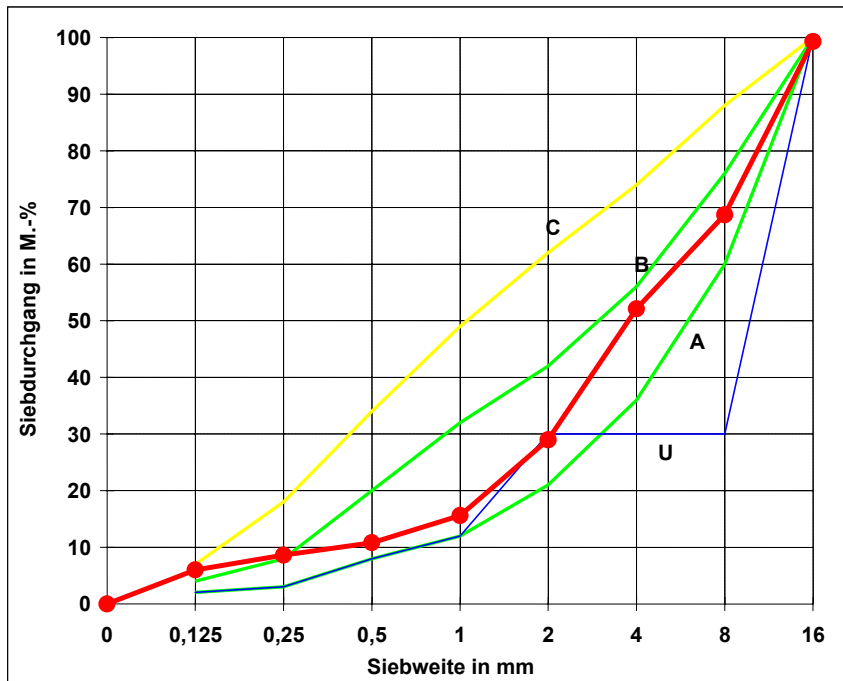


**Abbildung 3-5: Sieblinie mit B02**

Eine weitere Auswaschung oder Absiebung von Feinanteilen aus dem Basaltbrech-sand würde aber die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen.

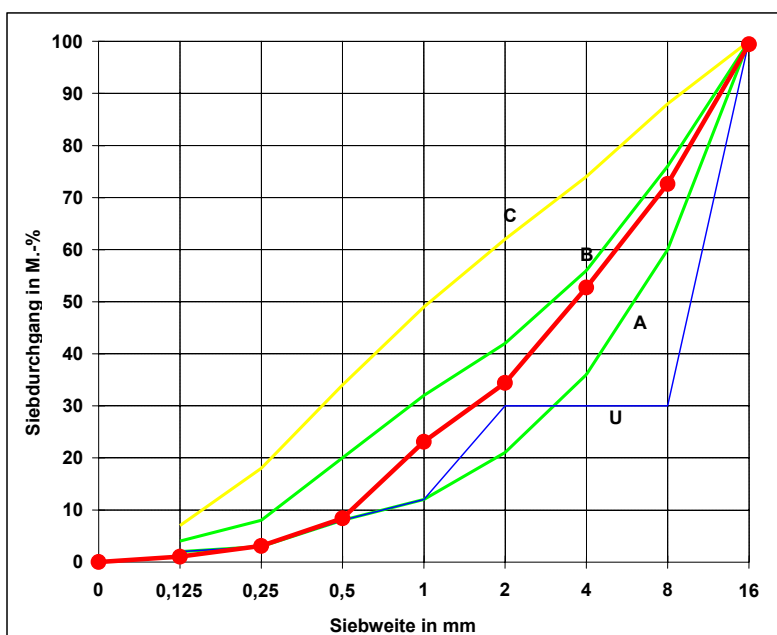
Auch bei den Sieblinien mit Basaltbrech-sanden aus dem Vertikalprallbrecher liegen die Werte für den Siebdurchgang bei 0,25 mm im Grenzbereich zwischen B und C,

für 0,125 mm bereits zwischen B und C. **Abbildung 3-6** zeigt dies beispielhaft für die Sieblinie mit B08KoK.



**Abbildung 3-6: Sieblinie mit B08oK**

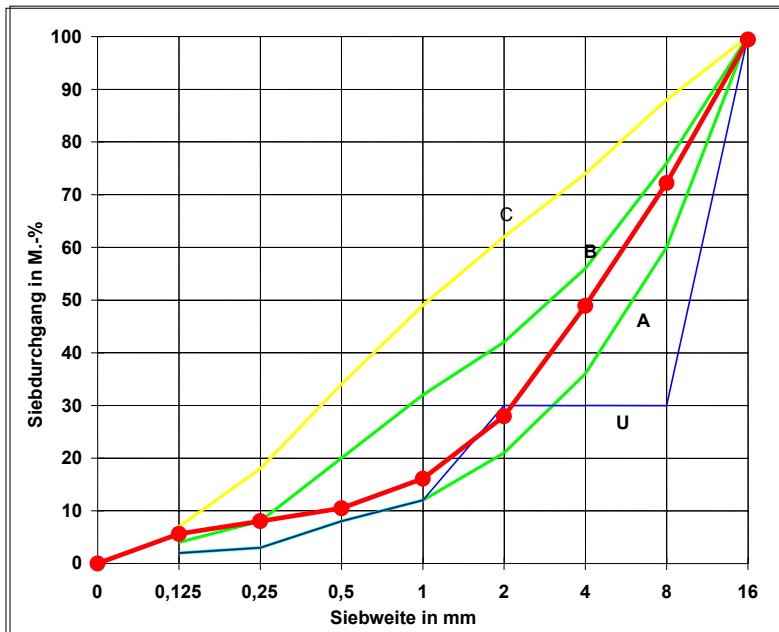
Der Kalksteinbrechsand K02 aus konventioneller Herstellung besitzt mit nur 2 M.-% des Anteils  $< 0,63 \mu\text{m}$  einen dem Natursand vergleichbaren niedrigen Gehalt. Dem entsprechend sind auch die Sieblinien im Feinbereich nahezu identisch, siehe **Abbildung 3-7**.



**Abbildung 3-7: Sieblinie mit K02**



Durch die Herstellung im Vertikalprallbrecher steigt der Anteil  $< 63 \mu\text{m}$  auch im Kalksteinbrechsand sehr stark an, so dass der Kurvenverlauf der Sieblinien mit diesen Brechsanden weitgehend denen der Sieblinien mit Basaltbrechsand gleicht, wie das Beispiel in **Abbildung 3-8** für K08oK zeigt.



**Abbildung 3-8: Sieblinie mit K08oK**

## 4 Untersuchungsverfahren

### 4.1 Mechanische Prüfungen der Sande

Die Ermittlung der **Fließzahl** sowie des **Abriebes** der Brechsande in der Kugelmühle erfolgte gemäß TP Min-StB Teil 3.7.2 [17] bzw. Teil 5.4.2 [18].

Die **Korngrößenverteilung** wurde gemäß TP Min-StB Teil 6.3.2 [19] bestimmt, aus der die Gleichförmigkeit D25/D75 nach Gleichung (4-1) berechnet wurde:

$$D_{25}/D_{75} = \frac{\text{Quadratloch – oder Maschenweite des Siebes bei } D = 25 \text{ M. – \%}}{\text{Quadratloch – oder Maschenweite des Siebes bei } D = 75 \text{ M. – \%}} \quad (4-1)$$

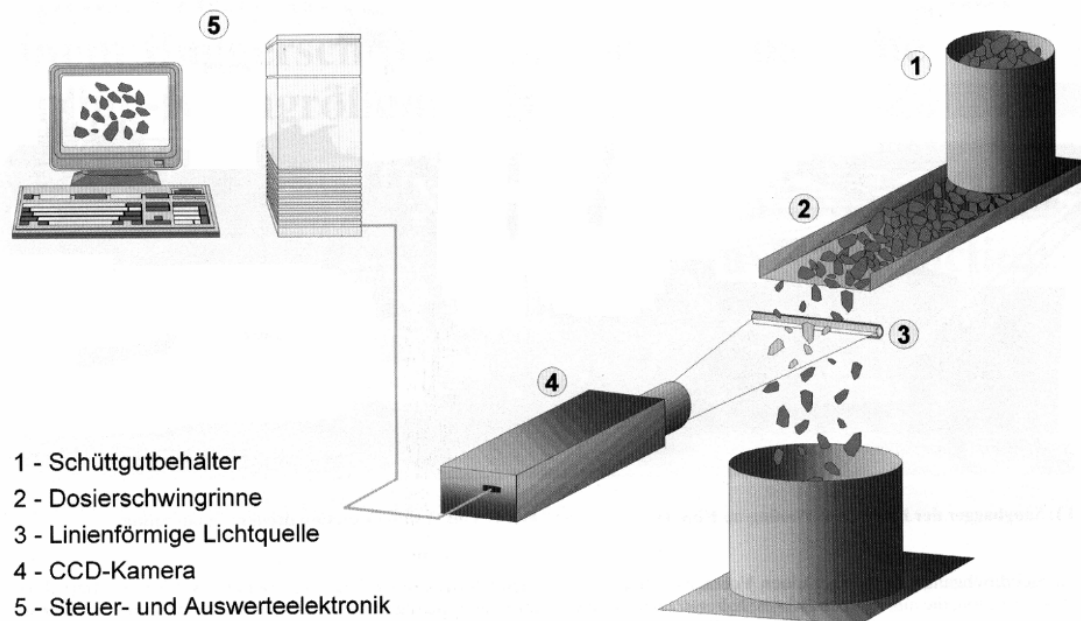
### 4.2 Photooptische Untersuchungen an den Sanden

Die photooptischen Prüfungen wurden mit einer computergestützten Partikelanalyse durchgeführt. Dabei wird von zweidimensionalen Strukturen auf dreidimensionale ohne wesentlichen Informationsverlust geschlossen.

Zugrunde gelegt wird die Annahme, dass sich ein zu untersuchendes Partikel bei genügend großer Anzahl der Einzeluntersuchungen in jeder denkbaren Richtung aufgenommen werden kann. Den empirisch geführten Beweis dazu hat DOWDES-WELL [20] geliefert. Er hat sich anlässlich der Fourier-Analyse von Quarzsanden mit diesem Thema befasst und eine Quarzsandprobe aus um 50° differierenden Winkeln aufgenommen. Die auf unterschiedlichen Aufnahmewinkeln beruhenden Fourier-Analysen weisen eine große Ähnlichkeit der berechneten Koeffizienten auf. Das Messprinzip der photooptischen Partikelanalyse zeigt **Abbildung 4-1**.

Zusammenballungen im zu analysierenden Aufgabegut werden auf der Dosierschwingrinne gelöst, so dass beim anschließenden freien Fall explizit Einzelteilchen von der hier dargestellten CCD-Zeilenkamera erfasst werden (CCD: Charge Coupled Device). Die in digitaler Form vorliegenden Messdaten werden an einen angeschlossenen PC weitergeleitet und sind dort unmittelbar einer Analyse zugänglich. Beispielsweise kann die Einstellung der Dosierschwingrinne korrigiert werden, wenn auf der Bildschirmprojektion Agglomerationen von Teilchen zu beobachten sind. Eine Reihe von Auswertungen liegt direkt nach erfolgter Messung vor, d. h., wenn das gesamte Aufgabegut den Raum zwischen Lichtquelle und CCD-Kamera passiert hat. Die ermittelte Anzahl- oder Volumenverteilung kann wahlweise auf verschiedenen Partikelgrößendefinitionen (statistischen Längen) oder auf dem Durchmesser des flächenäquivalenten Kreises basieren. Die Auswertung der Partikelprojektionsform

(in dieser Arbeit: Sphärizität, Kubizität, Martin-Durchmesser, Maximale Sehne) werden dann zeitversetzt zur Echtzeitmessung durchgeführt.

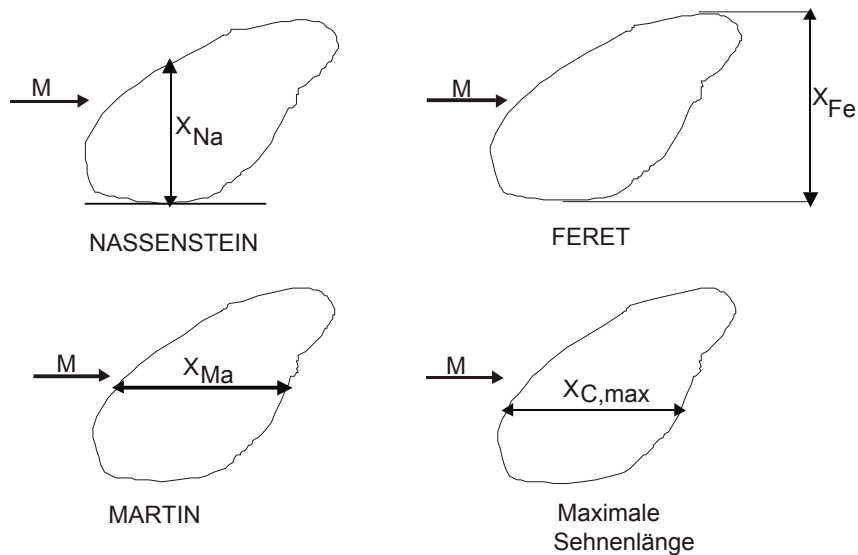


**Abbildung 4-1: Messprinzip eines CPA-Gerätes mit CCD-Zeilenkamera [21]**

Ein den Raum zwischen Lichtquelle und CCD-Zeilenkamera im freien Fall durchquerendes Partikel wird von dieser als Reihe aufeinander folgender „Linien“ erfasst. Aus diesen „Linien“ wird das Projektionsbild der Partikel konstruiert. Für solide Messungen, das sind solche, bei denen je gemessenes Partikel laut Hersteller mindestens 10 Bildpunkte (Pixel) als Grundlage der Gestaltrekonstruktion vorliegen, ist bei Zeilenkameras mit einem Dynamikbereich von ungefähr 100 zu rechnen. Der Dynamikbereich gibt das Verhältnis von Messober- zu Messuntergrenze an. Bei der CPA-Analyse der in dieser Arbeit untersuchten Sande wurde ein Messbereich mit einer Pixelgröße von  $50\ \mu\text{m}$  gewählt. Ein Pixel wird ab einer Überdeckung von 50 % registriert. Die kleinste berücksichtigte statistische Länge innerhalb der Kornformanalyse wurde zu  $315\ \mu\text{m}$  gewählt. Bei einem geschätzten Kubizitätswert der Analysesande von 1,5 würde dann die Kornformberechnung anhand von ca. 30 Pixeln stattfinden.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der photooptisch erlangten Ergebnisse wurde die Korngrößenverteilungsanalyse für die Korngrößendefinition „Äquivalentdurchmesser“ dreifach durchgeführt. Die größte Spannweite zwischen den drei Analyseergebnissen ergibt  $d_r = 0,3\ \text{Vol.-%}$ .

In **Abbildung 4-2** sind die in den photooptischen Untersuchungen verwendeten statistischen Partikeldurchmesser und der Durchmesser nach Nassenstein graphisch erläutert. Die Pfeile mit der Bezeichnung „M“ zeigen die Messrichtung an.



**Abbildung 4-2: Statistische Längen im Vergleich**

Die **Sphärizität**  $F_{S,\delta,n}$  entspricht dem Kehrwert des von COX [22] formulierten Formfaktors. Sie entspricht auch dem in Gleichung (4-2) angegebenen Größenverhältnis:

$$F_{S,\delta,n} = \frac{\text{Umfang der Partikelprojektion}}{\text{Umfang eines Kreises gleicher Fläche}} \quad (4-2)$$

mit:

- $\delta$  = Partikelgrößendefinition  
(F für Feret-Durchmesser,  $\ddot{A}$  für Äquivalentdurchmesser)
- $n$  = Berücksichtigte Partikelgrößenklasse  
(nur für in den Asphalten verwendeten Brechsande)
- $S$  = Sphärizität

Die bei der Sphärizität berücksichtigten Partikelgrößenklassen sind in **Tabelle 4-1** angegeben.

**Tabelle 4-1: Berücksichtigte Partikelgrößenklassen der Sphärizitäten**

Partikel- größendefinition	Partikelgrößenklasse [mm]			
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
$d_F, d_{\ddot{A}}$	2,5 - 1,0	1,0 - 0,5	0,5 - 0,315	-

Die **Kubizität**  $F_{Kub,\delta,n}$  entspricht der Beziehung in Gleichung (4-3). Untersuchungen auf der Grundlage dieser Beziehung enthält [23].

$$F_{\text{Kub},\delta,n} = \frac{\text{Feret – Durchmesser}}{\text{Maximale Sehne}} \quad (4-3)$$

Die bei der Kubizität berücksichtigten Partikelgrößenklassen enthält **Tabelle 4-2**.

**Tabelle 4-2: Berücksichtigte Partikelgrößenklassen der Kubizitäten**

Partikel- größendefinition	Partikelgrößenklasse [mm]			
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
$d_F$	2,5 - 0,71	0,71 - 0,5	0,5 - 0,4	0,4 - 0,315
$d_{\ddot{A}}$	2,5 - 2,0	2,0 - 1,0	1,0 - 0,5	0,5 - 0,315

Die **Konkavität**  $F_{\text{Kon},\delta,n}$  entspricht dem Kehrwert des von CHURCH [24] formulierten Formfaktors. Sie entspricht auch dem in Gleichung (4-4) angegebenen Größenverhältnis:

$$F_{\text{Kon},\delta,n} = \frac{\text{Feret – Durchmesser}}{\text{Martin – Durchmesser}} \quad (4-4)$$

Die bei der Konkavität berücksichtigten Partikelgrößenklassen sind in **Tabelle 4-3** enthalten.

**Tabelle 4-3: Berücksichtigte Partikelgrößenklassen der Konkavitäten**

Partikel- größendefinition	Partikelgrößenklasse [mm]			
	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
$d_F$	2,5 - 0,71	0,71 - 0,5	0,5 - 0,315	-
$d_{\ddot{A}}$	2,5 - 2	2,0 - 1,0	1,0 - 0,4	0,4 - 0,315

Die **Korngrößenverteilung** wurde volumetrisch ermittelt. Korngrößendefinitionen sind Feret- und Äquivalentdurchmesser. Die verwendeten Kontrolllängen (entspricht Siebmaschenweite bei Siebböden) sind in **Tabelle 4-4** aufgeführt.

**Tabelle 4-4: Kontrolllängen zur Bestimmung der volumetrischen Korngrößenverteilung**

$\delta$	Kontrolllängen [mm]																
$d_F, d_A$	5,0	4,0	3,55	3,15	2,5	2,0	1,6	1,0	0,71	0,63	0,5	0,4	0,315	0,25	0,2	0,09	0,063

Der **Parameter RRSBn** ist gleichzusetzen mit dem Streuungsparameter  $n$  der RRSB-Verteilungsfunktion (Gleichung (6-2)), deren Summe der quadratischen Abstände von der ermittelten Korngrößenverteilung minimal ist.

Der Vergleich der Kornanzahlverteilungen der untersuchten Brechsande zur Verwendung in Asphalt ergab qualitativ auffällige Unterschiede im Verhältnis der Kornklassen 0,2/0,09 mm und 0,09/0,063 mm. Zur quantitativen Unterscheidung der Brechsande anhand dieses Unterschieds wurde der **Kornanzahlverteilungsquotient  $QKA_\delta$**  formuliert. Er ergibt sich aus Gleichung (4-5):

$$QKA_\delta = \frac{\text{Kornanzahl in der Kornklasse } 0,2/0,09 \text{ mm}}{\text{Kornanzahl in der Kornklasse } 0,09/0,063 \text{ mm}} \quad (4-5)$$

Der **Feinheitsgrad  $FG_\delta$**  der Brechsande wird in Anlehnung an den Abramschen Feinheitsmodul [25] formuliert. Er wurde nach Gleichung (4-6) ermittelt. Zur Bestimmung der Fläche oberhalb der volumetrischen Korngrößenverteilungslinie wurde das Durchgangsvolumen an 11 Kontrolllängen verwendet.

$$FG_\delta = \frac{1}{11} \sum D_{ki} \quad i = 2,0; 1,6; 1,0 \dots 0,09 \text{ mm} \quad (4-6)$$

mit:

$D_{ki}$  = Kontrolllänge in der photooptischen Analyse (vergleichbar mit der Quadratloch- oder Maschenweite von Siebböden)

Die photooptisch ermittelte **Gleichförmigkeit  $D25/D75_\delta$**  wurde gemäß Gleichung (4-1) berechnet.

### 4.3 Untersuchungen an Asphalt

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungsverfahren wurden auf beide untersuchten Asphalte angewandt, lediglich der Marshall-Versuch wurde nur bei Asphaltbeton ausgeführt.

Die zur Prüfung herangezogenen Asphaltprobekörper wurden gemäß DIN 1996-4 [26] hergestellt und danach prüfungsspezifisch vorbereitet.

Die Bestimmung der **Dehnungsrate** erfolgte gemäß TP A-StB [27]. Die darin vorgeschlagenen Versuchsparameter wurden übernommen. Zusätzlich zur Dehnungsrate wurde die Dehnung der Asphaltbetone nach 10 kLW bestimmt. Da einige Splittmastixasphalte nach 10 kLW schon deutliche Gefügezerstörungen erlitten hatten, wurde die Dehnung nach 4 kLW als zusätzlicher Parameter gewählt. Die Auswertung erfolgte computergestützt mit Hilfe des mathematischen Ansatzes in [27].

Der **Verdichtungswiderstand** (=„D-Wert“) wurde gemäß Arbeitsanleitung [28] ermittelt. Die im Merkblatt für das Verdichten von Asphalt [29] dokumentierten Erfahrungen mit der Verdichtbarkeit von Asphalt legen nahe, dass der D-Wert sich als Unterscheidungsmerkmal verschiedener Asphalte auch mit einer Verdichtungsarbeit von 100 Verdichtungsschlägen im Marshall-Gerät heranziehen lässt. Aufgrund der damit auch verbundenen Reduzierung des Arbeitsaufwandes wurde der Verdichtungswiderstand bei einer aufgetragenen Verdichtungsarbeit von ca. 2100 Nm (= 100 Schläge) ermittelt. Messung und Auswertung erfolgten auch hier computergestützt.

Die Bestimmung des **Spaltzugfestigkeitsabfalls nach Wasserlagerung** wurde gemäß dem in [30] beschriebenen Verfahren der TU Braunschweig durchgeführt.

**Marshall-Stabilität** und **-Fließwert** sowie **Dichten** und **Hohlraumgehalte** wurden gemäß DIN 1996 -11 [31] bzw. DIN 1996-7 [32] bestimmt.

#### 4.4 Untersuchungen an Beton

Die Bestimmung der **Frischbetoneigenschaften** - Frischbetontemperatur, Konsistenz, Rohdichte und Luftgehalt - erfolgte nach DIN 1048-1 [33]. Diese Norm sieht zur Bestimmung der Konsistenz sowohl den Ausbreitversuch als auch den Verdichtungsversuch vor. Aufgrund der Steifigkeit der Betone konnte nur der Verdichtungsversuch angewandt werden.

Die Bestimmung der **Festbetoneigenschaften** - Rohdichte, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Wasserundurchlässigkeit - erfolgte nach DIN 1048-5 [34].

Die **Carbonatisierungstiefe** wurde nach der Regelung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [35] festgestellt.

Zur Bestimmung des **dynamischen E-Moduls** wurde ein Grindo-Sonic-Gerät [36] verwendet. Das Prinzip der Messung beruht auf der Ermittlung der Eigenschwingzeit nach Impulsanregung. Die Messung ist zerstörungsfrei und erfolgte an Betonbalken mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 50 cm.

## 5 Statistische Methoden zur Beurteilung der Ergebnisse

Für jeden der in den Asphalten verwendeten Brechsande wurden insgesamt 59 Bewertungsparameter in zehn Gruppen ermittelt. Davon sind 48 Parameter in sechs Gruppen als die die Kornform beschreibende Parameter zu werten. Die sachliche Deutung der eventuell gefundenen kausalen Zusammenhänge zwischen den Bewertungsparametern und den gefundenen Asphalteigenschaften liegt außerhalb der statistischen Methodenlehre. Eine Korrelation zwischen den Eigenschaften kann möglicherweise auch durch eine gemeinsame Abhängigkeit einer nicht untersuchten Größe zustande kommen.

Eine wissenschaftlich sinnvolle Beurteilung von Zusammenhängen zwischen abhängigen und unabhängigen Eigenschaften setzt daher die Kenntnis und den Überblick über die untersuchten Parameter im technischen Sinne voraus.

In der Statistik wird daher versucht, die ermittelten Parameter sinnvoll zu dezimieren. Mit dem Ziel, einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Brechsand- und Asphalteigenschaften anhand der Durchführung einer multiplen linearen Regressionsrechnung zu finden, wurde die Zahl der je Brechsand ermittelten Kornformparameter mittels bivariater Korrelationsanalysen innerhalb der sechs Gruppen reduziert. Dazu wurden zunächst Parametergruppen gebildet, die auf einem zweiseitigen Signifikanzniveau nach Pearson [37] von kleiner als 1 ‰ korrelieren. Die so gefundenen Parameter einer Gruppe wurden arithmetisch gemittelt. Die Zahl der Kornformparameter konnte auf diese Weise auf 20 reduziert werden.

Die Regressionsanalysen wurden mit der Software SPSS [38] im Modus „Stepwise“ durchgeführt. In diesem Regressionsmodus werden die unabhängigen Variablen nacheinander in die Regressionsgleichung einbezogen, wobei nur diejenigen Variablen gewählt werden, die bestimmten Gütekriterien entsprechen. Als Gütekriterium wurde das Signifikanzniveau ihres F-Wertes [37] gewählt. Im ersten Schritt wird eine einfache Regression mit derjenigen Variablen durchgeführt, die die höchste Korrelation mit der abhängigen Variablen (Asphalteigenschaft) aufweist. In den folgenden Schritten wird dann jeweils die Variable mit der höchsten partiellen Korrelation [37] ausgewählt.

Multikollinearität wirkt sich steigend auf das Signifikanzniveau der Regressionsparameter aus. So lassen sich auf der einen Seite durch gut korrelierende unabhängige Variable fast immer 100%ige Korrelationen zur abhängigen Variablen erzeugen. Auf der anderen Seite kann man bei korrelierenden Variablen natürlich nicht mehr von deren Unabhängigkeit sprechen, was zur Folge hat, dass die Regressionskoeffizienten nicht eindeutig bestimmt werden können. (Für ein Bestimmtheitsmaß von



$r^2 = 1$  zwischen den „unabhängigen“ Variablen  $x_1$  und  $x_2$  existieren unendlich viele Lösungen für deren Regressionskoeffizienten.) Allerdings liegt der Variablenbereich auf einer Geraden in der  $x_{1/2}$ -Ebene. Die gefundenen Regressionslösungen bilden eine Ebenenschar mit dieser Geraden als Drehachse. Mit SPSS ist es möglich, die Aufnahme von untereinander korrelierenden Variablen in die Regressionsrechnung durch die Überprüfung der Variablen-toleranz [38] zu vermeiden. Die Aufnahme unterbleibt, wenn der Toleranzwert unter einem Schwellenwert von 0,01 liegt.

Die rationale Bewertung der Brechsandparameter innerhalb der multiplen linearen Regression erfolgte über die Angabe der standardisierten Regressionskoeffizienten [38]. Diese erhält man durch die Multiplikation der nicht standardisierten Regressionskoeffizienten mit dem Quotienten der Standardabweichungen der unabhängigen Variablen und der Standardabweichungen der abhängigen Variablen. Durch die Standardisierung werden die unterschiedlichen Messdimensionen der verschiedenen Brechsandprüfungen, die sich in den Regressionskoeffizienten niederschlagen, eliminiert und somit vergleichbar gemacht. Über die Beträge der standardisierten Regressionskoeffizienten lässt sich somit der Einfluss der Parameter direkt ablesen.

Die Prüfung der Regressionskoeffizienten erfolgte über die Student-t-Verteilung [37]. Mit Hilfe von SPSS war es möglich, die Vertrauenswahrscheinlichkeit direkt zu berechnen und anzugeben. Dabei wurden ausschließlich Parameter berücksichtigt, deren Vertrauenswahrscheinlichkeit größer als 95 % war.

Zur Einschätzung der nicht standardisierten Regressionskoeffizienten werden deren 95%ige Konfidenzintervalle angegeben.

Die Angabe bestimmter Regressionskoeffizienten der Brechsandparameter ist dann sinnvoll, wenn die Parameter nicht beliebig austauschbar sind. Dies wurde mit einer doppelten partiellen Korrelationsanalyse überprüft. Dabei wurden jeweils diejenigen Parameter als Kontrollvariablen eingesetzt, die sich bezüglich ihrer bivariaten Korrelationen ähnlich sind. Durch die gefundenen partiellen Korrelationen konnten die Ergebnisse der Regressionsanalyse bestätigt werden.

Mineralogische Eigenschaften und Oberflächenstrukturen der Brechsande, die durch die CPA nicht erfasst werden konnten, wurden innerhalb dieser Arbeit nicht rational (auf einer Ratioskala) bewertet. Als Mittel für die nominale Bewertung dieser Eigenschaften wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse [39] gewählt, die mit SPSS durchgeführt wurde. Als Faktor wurde die Gesteinsart festgelegt.

Den Maßstab zur Beurteilung des empirischen (in den Laborversuchen ermittelten) F-Wertes bilden die theoretische F-Verteilung und das daraus zu berechnende Signifikanzniveau. Mit dem Signifikanzniveau wurde der Einfluss des Faktors (Gesteinsart) auf die Asphalteeigenschaften abgeschätzt.

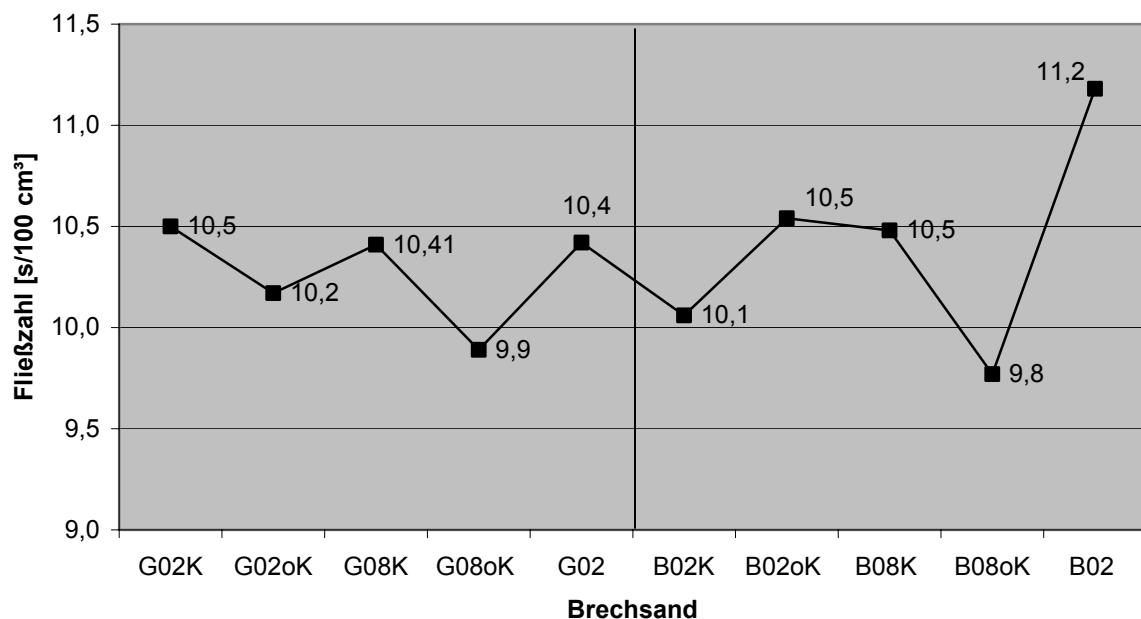
## 6 Ergebnisse der Sanduntersuchungen

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit von einer diskreten Größe, dem Brechsand, graphisch dargestellt. Um den Vergleich der Brechsandeigenschaften übersichtlicher zu gestalten, werden die ermittelten (Ordinaten-) Werte geradlinig verbunden.

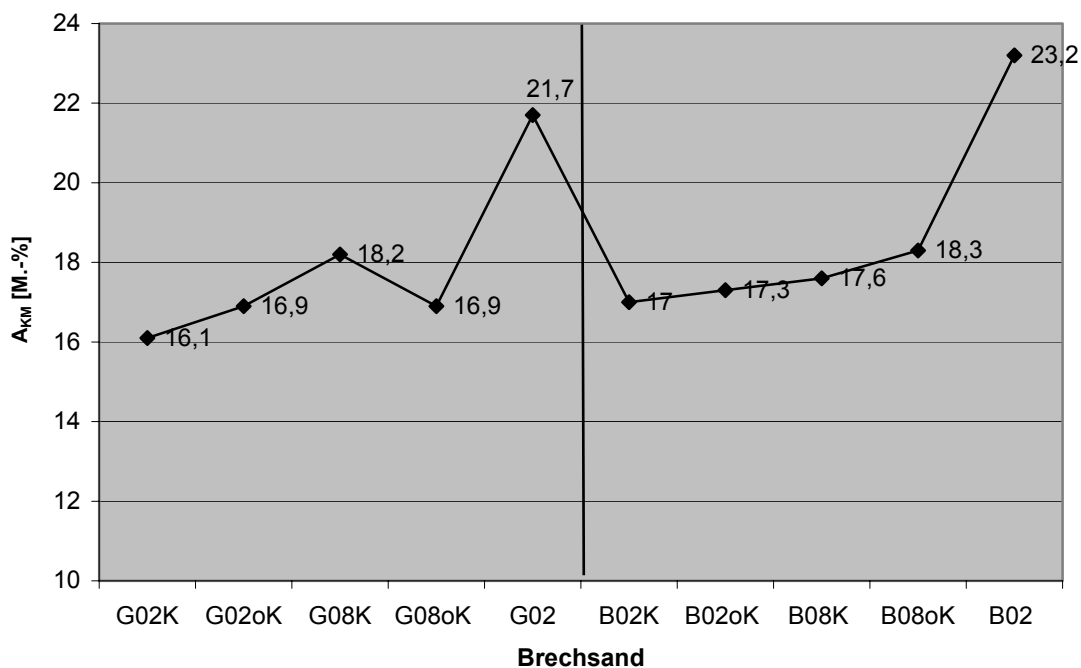
### 6.1 Ergebnisse der Untersuchungen an den Sanden zur Verwendung in Asphalt

#### 6.1.1 Mechanische Eigenschaften der Sande

Die Fließzahlen der Brechsande aus Grauwacke und Basalt sind in **Abbildung 6-1**, der Abrieb der Brechsande in der Kugelmühle in **Abbildung 6-2** dargestellt.



**Abbildung 6-1:** Fließzahl der Brechsande aus Grauwacke und Basalt



**Abbildung 6-2: Abrieb in der Kugelmühle der Brechsande aus Grauwacke und Basalt**

**Tabelle 6-1** enthält die Angaben zur Korngrößenverteilung der Brechsande, bevor Über- und Unterkorn abgesiebt wurden.

Für alle spezifischen Sanduntersuchungen sowie für die Verwendung im Asphalt wurden die Brechsande von Über- und Unterkorn befreit. Die sich dann ergebenden Korngrößenverteilungen sind in **Tabelle 6-2** dargestellt.

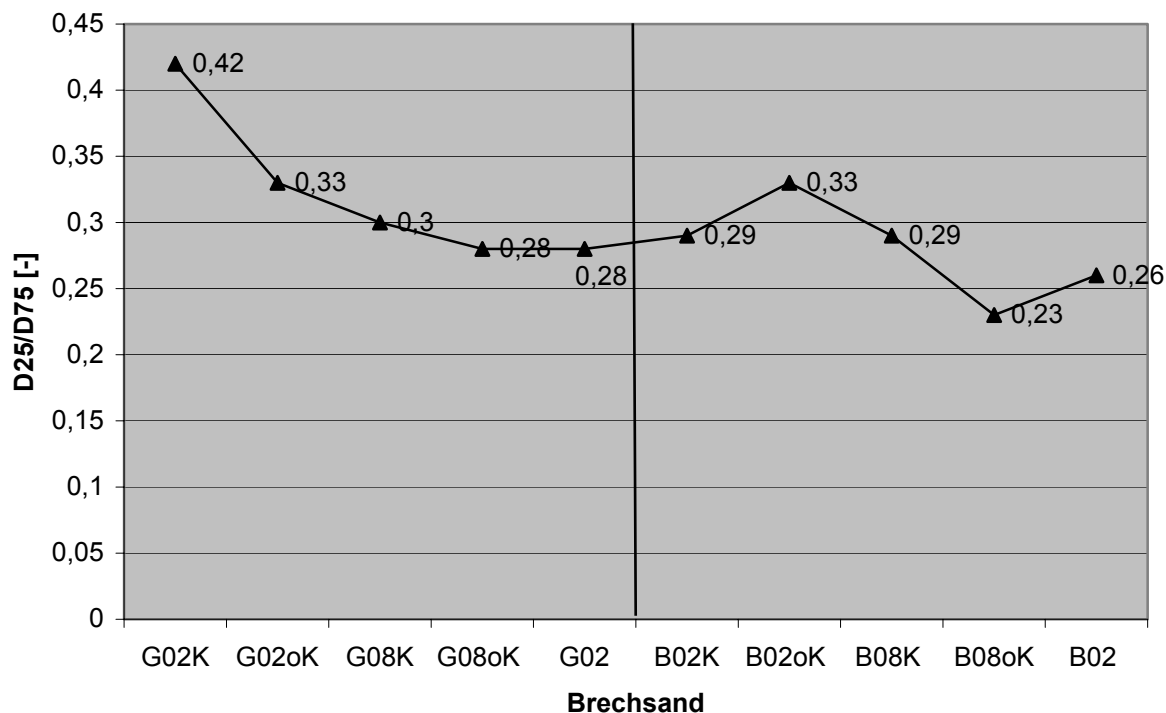
**Tabelle 6-1: Korngrößenverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt vor Absiebung von Über- und Unterkorn**

Sieb- weite [mm]	Durchgang [M.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	78,1	83,8	78,6	78,8	81,8	81,9	75,2	73,5	85,5	96,5
0,71	38,8	43,2	41,8	44,0	43,7	43,9	38,1	39,5	49,6	52,5
0,25	22,4	28	26,7	28,5	25,2	28,1	22,9	26,3	35,1	35,1
0,09	16,7	20,3	19,1	20,3	16,1	18,8	15,4	17,8	23,6	23,2

**Tabelle 6-2: Korngrößenverteilung der Brechsande nach Absiebung von Über- und Unterkorn**

Siebweite [mm]	Durchgang [M.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B020oK	B08K	B0/8oK	B02
2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,71	36	36,1	38,2	40,5	42	39,8	38	39	42	40
0,25	9,3	12,1	12,8	14	13,9	14,7	12,5	15,3	18,6	16,2

In **Abbildung 6-3** sind die Ungleichförmigkeitszahlen  $D_{25}/D_{75}$  der Brechsande nach Absiebung von Über- und Unterkorn dargestellt.



**Abbildung 6-3: Ungleichförmigkeitszahlen  $D_{25}/D_{75}$  der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ohne Über- und Unterkorn**

### 6.1.2 Ergebnisse der photooptischen Sanduntersuchungen

Um die Anzahl der photooptisch gefundenen Kornformparameter für die folgende multiple lineare Regressionsrechnung möglichst klein zu halten, wurde die Anzahl der gefundenen Parameter mittels bivariater Korrelationsanalyse reduziert. Zusam-

mengefasst und gemittelt wurden die Parameter, die auf einem zweiseitigen Signifikanzniveau von  $< 1\text{‰}$  korrelieren.

Die photooptische Analyse der Korngrößenverteilung erfolgte an den Brechsanden mit den Korngrößenverteilungen gemäß **Tabelle 6-2**.

Die festgestellten Korngrößenverteilungen sind in **Tabelle 6-3** für den Feret-Durchmesser und in **Tabelle 6-4** für den Äquivalentdurchmesser aufgeführt sowie in den **Abbildungen 6-4 bis 6-7** graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-3: Volumetrische Korngrößenverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_F$ )**

$d_F$ [mm]	Durchgang [Vol.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
5,0	100,00	99,68	99,67	100,00	98,66	100,00	99,72	99,59	100,00	100,00
4,0	98,49	98,38	97,81	98,25	94,98	99,84	98,75	97,21	99,54	99,04
3,55	96,48	97,10	94,79	95,69	90,58	98,51	97,22	95,87	98,35	97,31
3,15	91,59	92,78	90,65	90,63	84,64	95,41	94,95	91,96	96,39	94,60
2,5	79,19	83,40	82,15	79,80	73,36	86,28	87,67	83,40	91,55	87,38
2,0	62,68	68,91	70,30	66,59	60,22	73,57	74,56	68,49	84,06	78,08
1,6	49,5	57,00	59,38	55,12	49,62	61,93	63,75	56,61	76,65	69,93
1,0	27,16	33,45	38,80	33,74	29,51	38,79	41,51	35,01	57,39	50,23
0,71	17,80	22,2	27,98	24,70	19,51	26,49	29,02	24,71	42,44	36,93
0,63	15,41	19,11	24,81	22,19	16,69	23,03	25,38	21,96	38,09	32,53
0,5	13,05	15,97	21,48	19,56	13,92	19,53	21,52	19,14	33,48	27,59
0,4	8,22	9,56	13,98	13,48	8,16	12,30	13,25	13,06	23,42	16,53
0,315	5,74	6,38	9,92	9,86	5,37	8,86	9,11	9,72	17,86	11,15
0,25	3,29	3,45	5,77	5,83	2,80	5,71	5,20	6,16	11,72	6,85
0,2	1,22	1,17	2,15	2,18	0,92	2,64	1,98	2,68	5,49	3,15
0,09	0,11	0,10	0,18	0,18	0,08	0,32	0,20	0,34	0,86	0,36
0,063	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

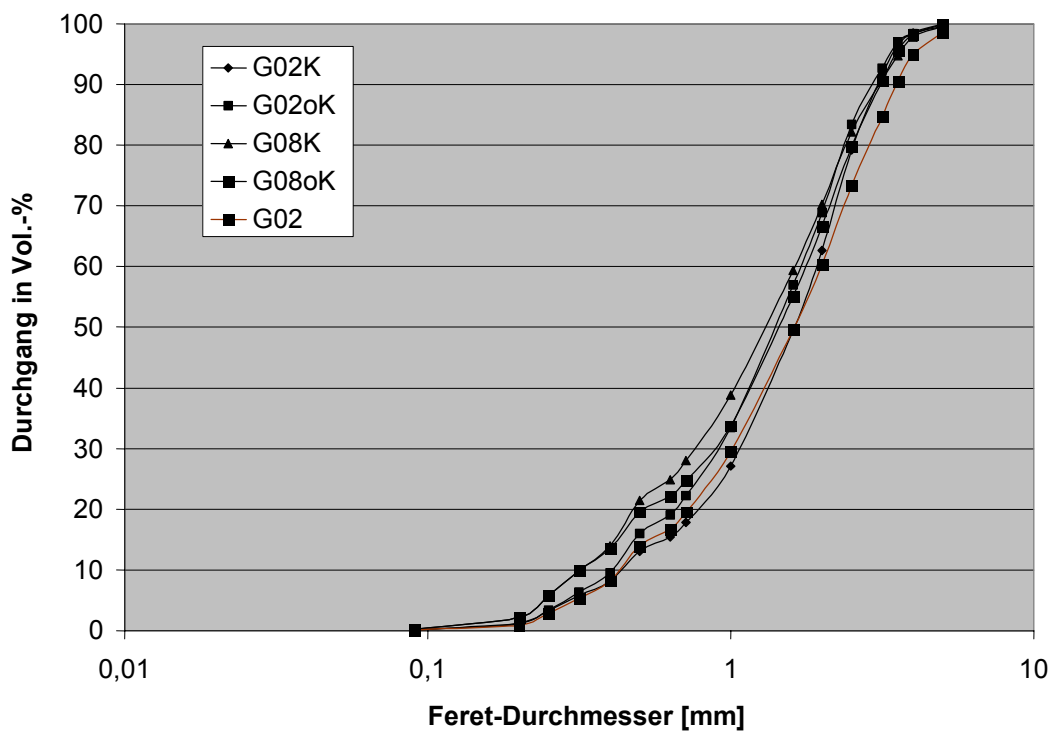


Abbildung 6-4: Korngrößenverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_F$ )

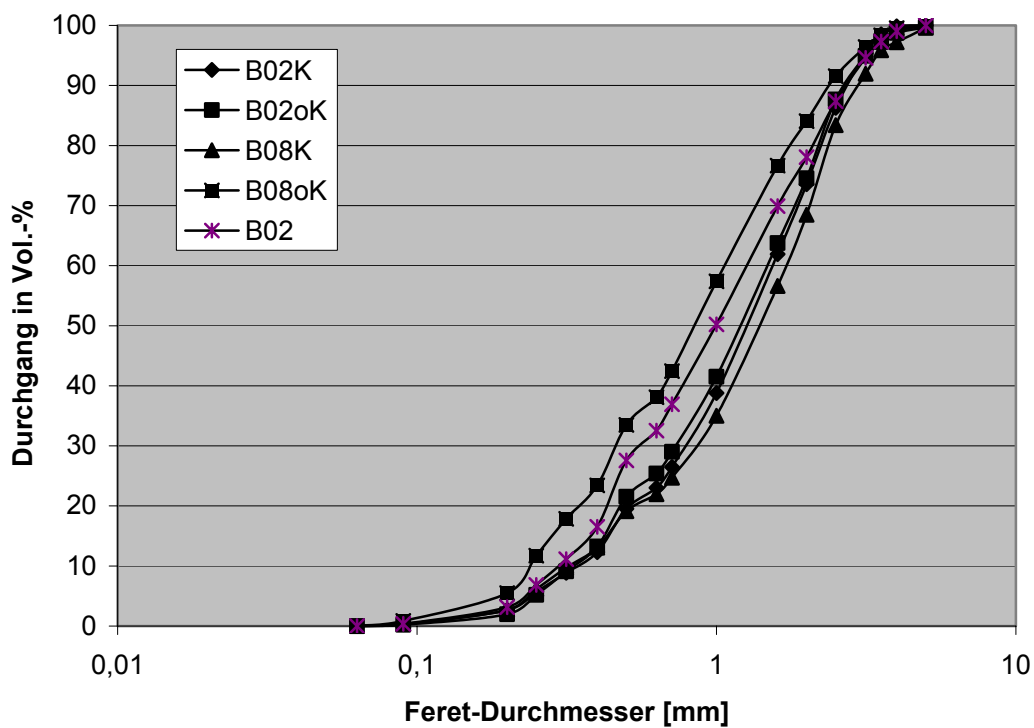


Abbildung 6-5: Korngrößenverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_F$ )



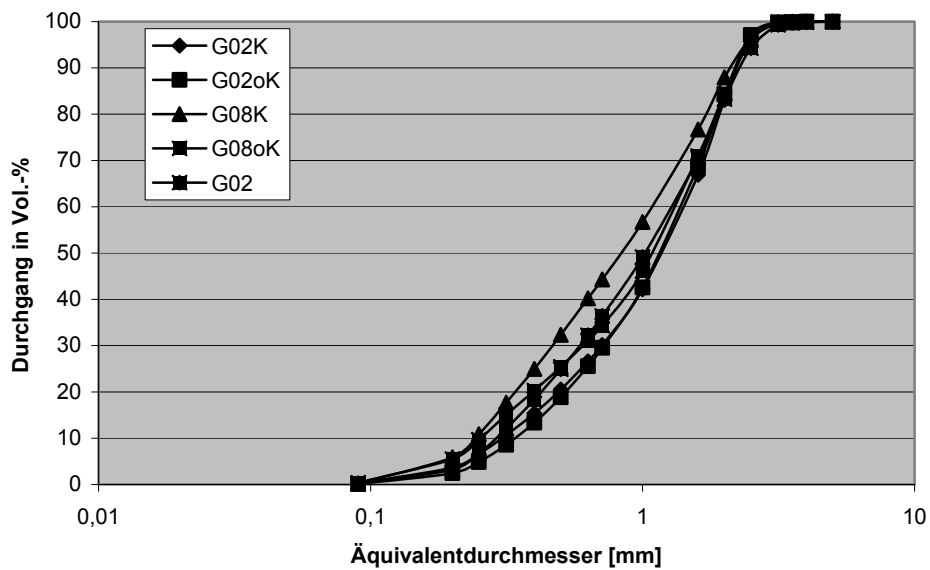


Abbildung 6-6: Korngrößenverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )

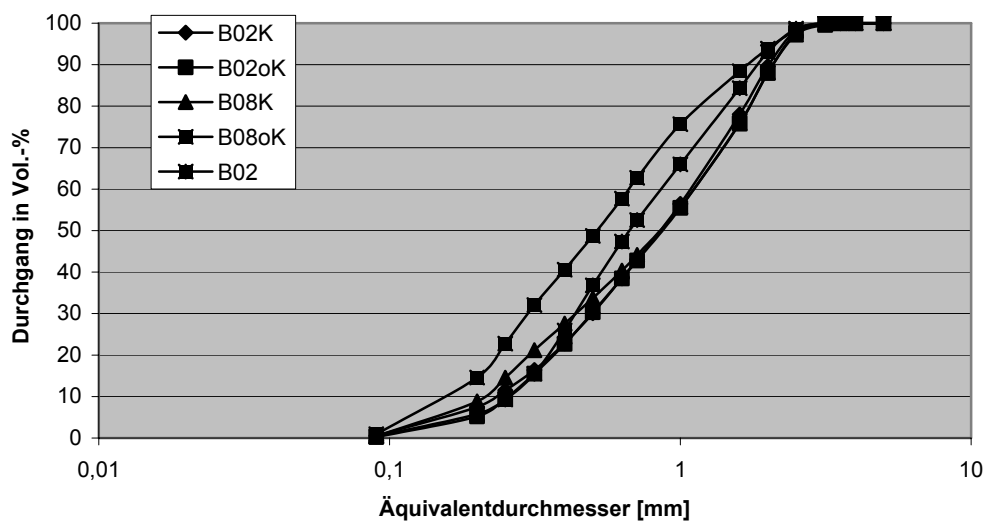


Abbildung 6-7: Korngrößenverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )



Zur Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs einer Korngrößenverteilung mit relevanten Asphalteigenschaften ist es sinnvoll, die experimentell gefundene Korngrößenverteilung durch einparametrische Funktionen zu approximieren. Die Approximation erfolgt mit der Potenzverteilung gemäß Gleichung (6-1) sowie mit der RRSB-Verteilung gemäß Gleichung (6-2).

$$Y = (x/x_{\max})^m \quad (6-1)$$

$$Y = 1 - \exp(-((x/x_{63,3})^n)) \quad (6-2)$$

Mittels bivariater Korrelationsanalyse wurde eine der beiden Verteilungen zur Approximation qualifiziert. Die **Tabellen 6-5** und **6-6** enthalten die bivariaten Bestimmtheitsmaße der beiden Verteilungen mit den Analysewerten. Die aufgeführten Exponenten „m“ und „n“ ergaben dabei die größtmögliche Näherung zu den Analysewerten.

**Tabelle 6-5: Bivariate Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen den theoretischen und den festgestellten Verteilungen der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_F$ )**

Brechsand	RRSB/po	n	Potenz/po	m
<b>G02K</b>	0,998	1,57	0,984	0,76
<b>G02oK</b>	0,998	1,51	0,986	0,69
<b>G08K</b>	0,996	1,33	0,994	0,63
<b>G08oK</b>	0,996	1,31	0,994	0,68
<b>G02</b>	0,998	1,44	0,992	0,76
<b>B02K</b>	0,998	1,43	0,990	0,63
<b>B02oK</b>	0,996	1,40	0,990	0,61
<b>B08K</b>	0,996	1,35	0,992	0,66
<b>B08oK</b>	0,996	1,24	0,988	0,48
<b>B02</b>	0,992	1,29	0,986	0,55

**Tabelle 6-6: Bivariate Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen den theoretischen und den festgestellten Verteilungen der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_{\lambda}$ )**

Brechsand	RRSB/po	n	Potenz/po	m
<b>G02K</b>	0,997	1,48	0,994	1,0
<b>G02oK</b>	0,998	1,59	0,993	1,0
<b>G08K</b>	0,995	1,26	0,978	0,75
<b>G08oK</b>	0,996	1,32	0,992	0,88
<b>G02</b>	0,996	1,35	0,984	0,89
<b>B02K</b>	0,998	1,32	0,985	0,76
<b>B02oK</b>	0,995	1,31	0,981	0,78
<b>B08K</b>	0,995	1,17	0,984	0,73
<b>B08oK</b>	0,993	1,25	0,943	0,53
<b>B02</b>	0,993	1,47	0,958	0,68

Als Beurteilungskriterium wurde die Summe der quadratischen Abweichungen verwendet. Die RRSB-Verteilung korreliert in 18 von 20 Fällen besser als die Potenzverteilung. Somit wurde der Exponent „n“ der RRSB-Verteilung als beschreibender Parameter der photooptischen Korngrößenverteilung verwendet.

Der kleinste Quotient der Summen der quadratischen Abweichungen wurde beim Grauwackebrechsand G08oK ( $\delta = d_F$ ) gefunden. Hier unterscheiden sich die beiden Approximationsmöglichkeiten daher im Vergleich am wenigsten. Trotzdem eignet sich auch hier die RRSB-Verteilung besser zur Beschreibung der tatsächlichen Verteilung. **Abbildung 6-8** macht optisch diesen Sachverhalt deutlich. In **Abbildung 6-9** sind die Parameter „n“ der untersuchten Brechsande vergleichend dargestellt.

Die Verteilungsparameter D25/D75 und FG (Feinheitsgrad) sind in den **Abbildungen 6-10** und **6-11** für die Grauwacke- und Basaltbrechsande dargestellt.

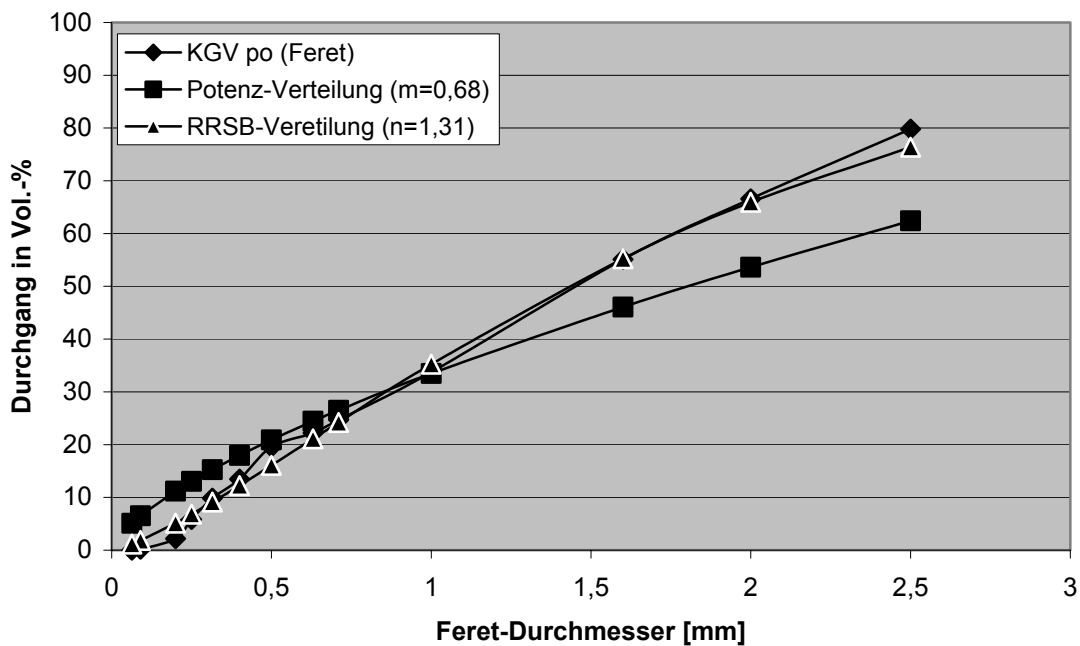


Abbildung 6-8: Approximation der theoretischen an die tatsächliche Verteilung für den Grauwackebrechsand

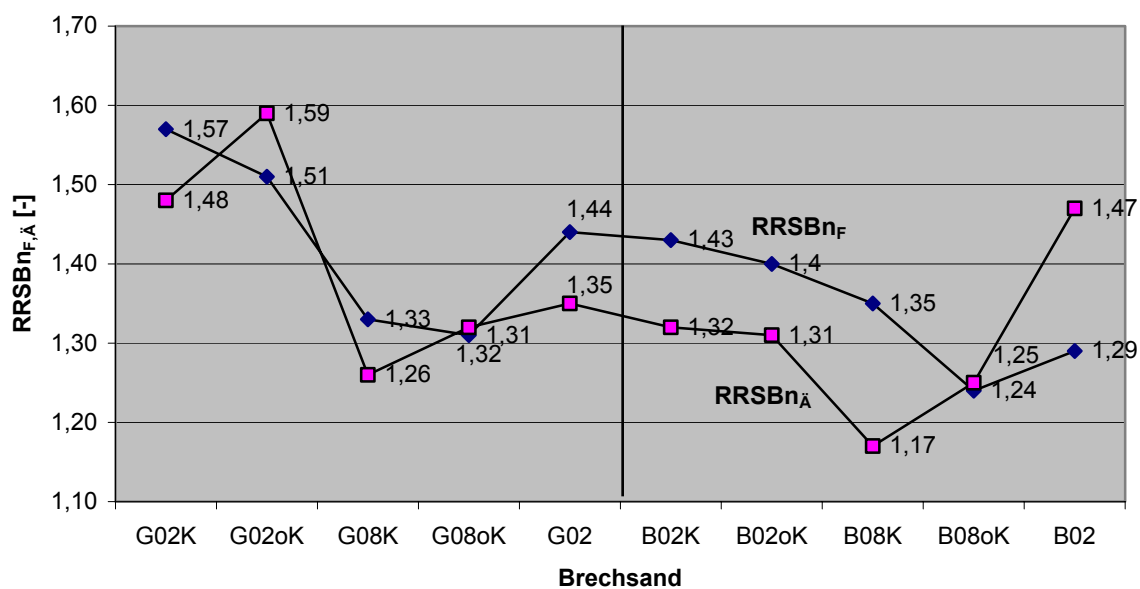


Abbildung 6-9: Vergleich der RRSBn-Parameter für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt

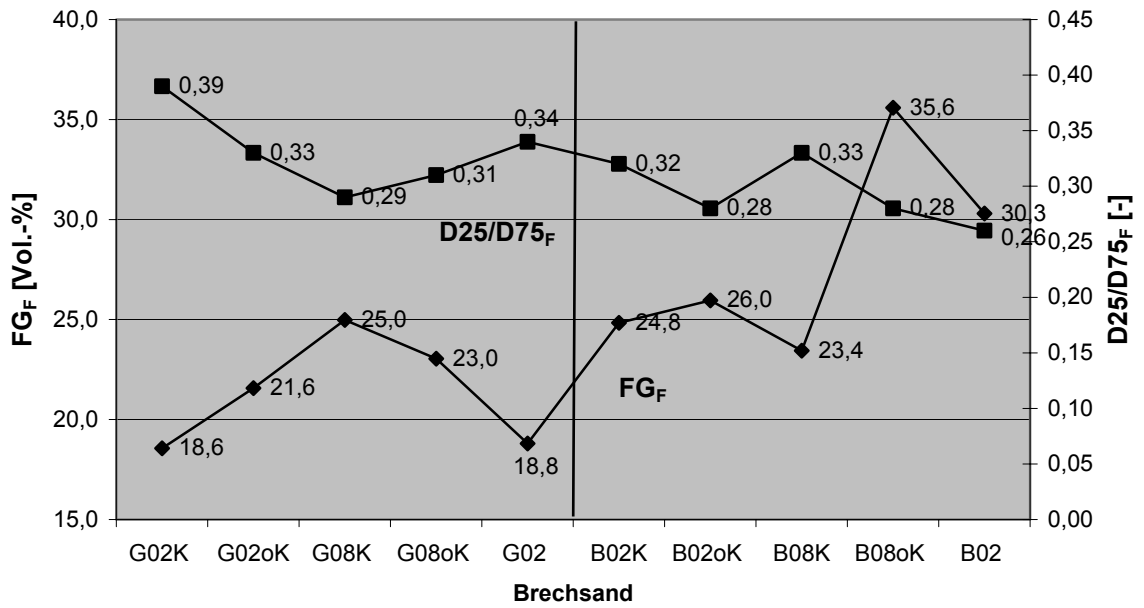


Abbildung 6-10: Vergleich von  $D25/D75_F$  und  $FG_F$  für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt

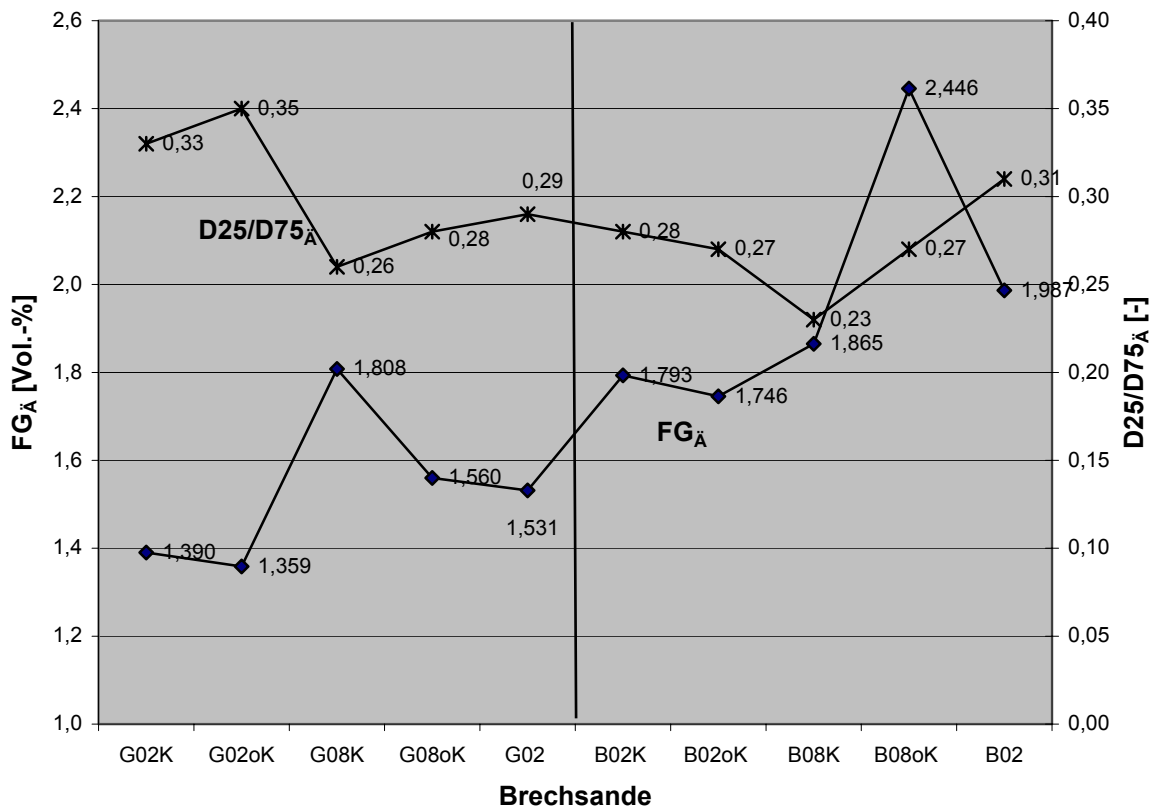


Abbildung 6-11: Vergleich von  $D25/D75_A$  und  $FG_A$  für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt





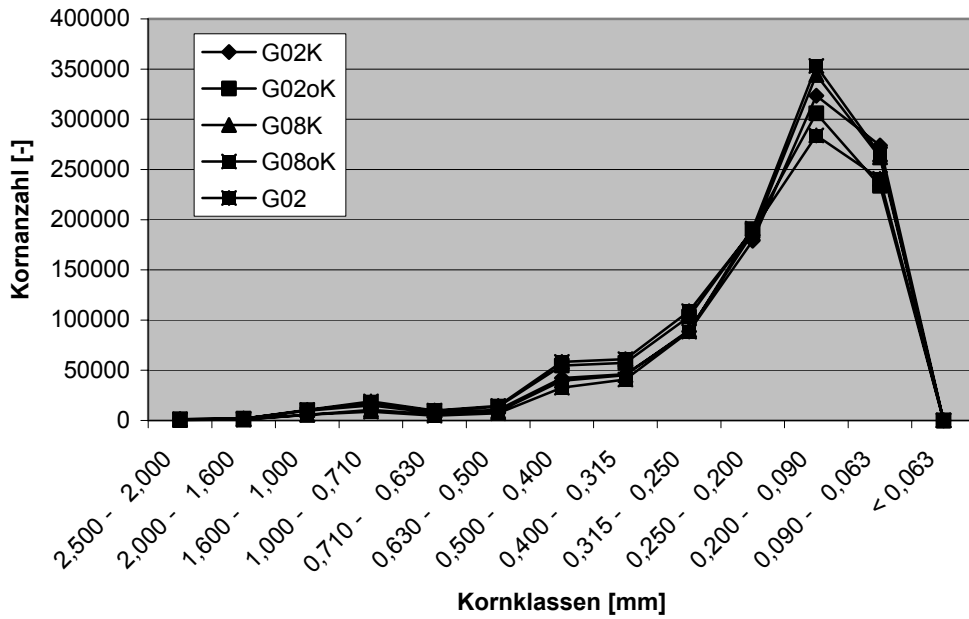


Abbildung 6-12: Kornanzahlverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_F$ )

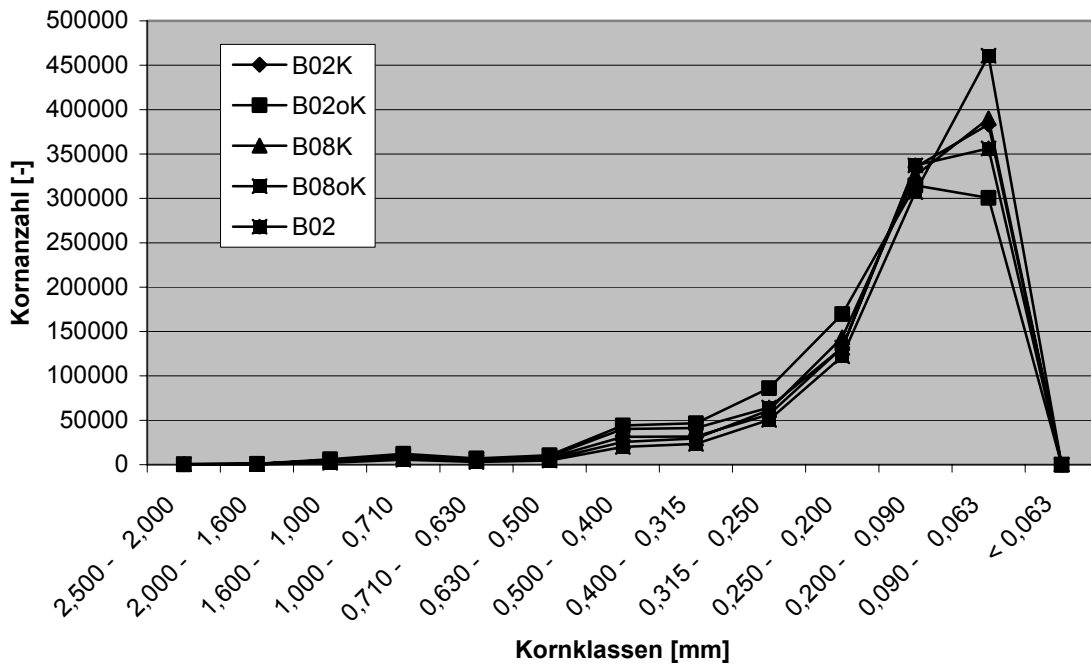


Abbildung 6-13: Kornanzahlverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_F$ )

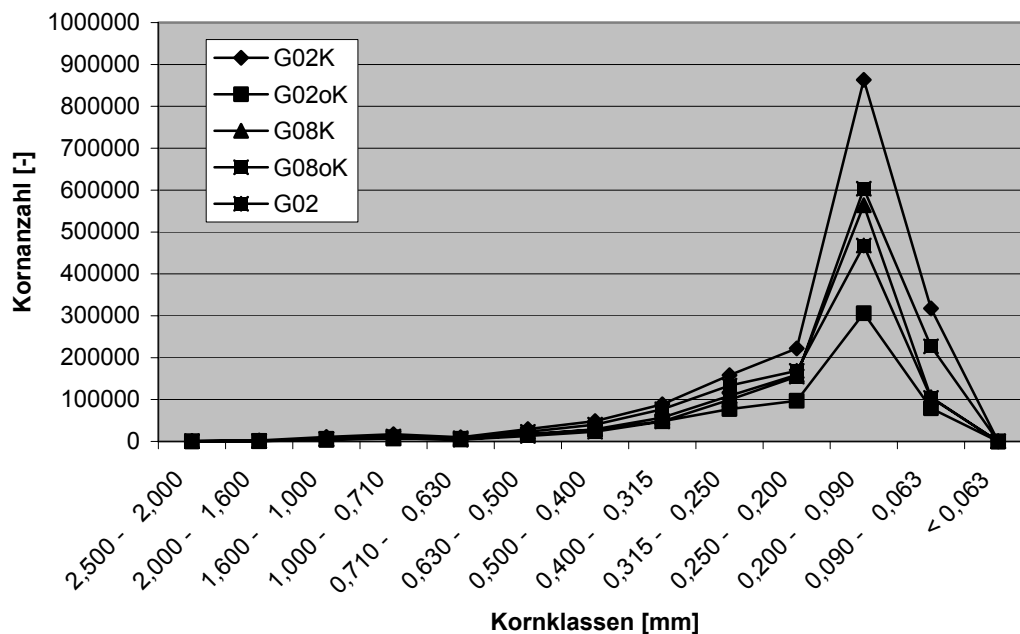


Abbildung 6-14: Kornanzahlverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_{\bar{A}}$ )

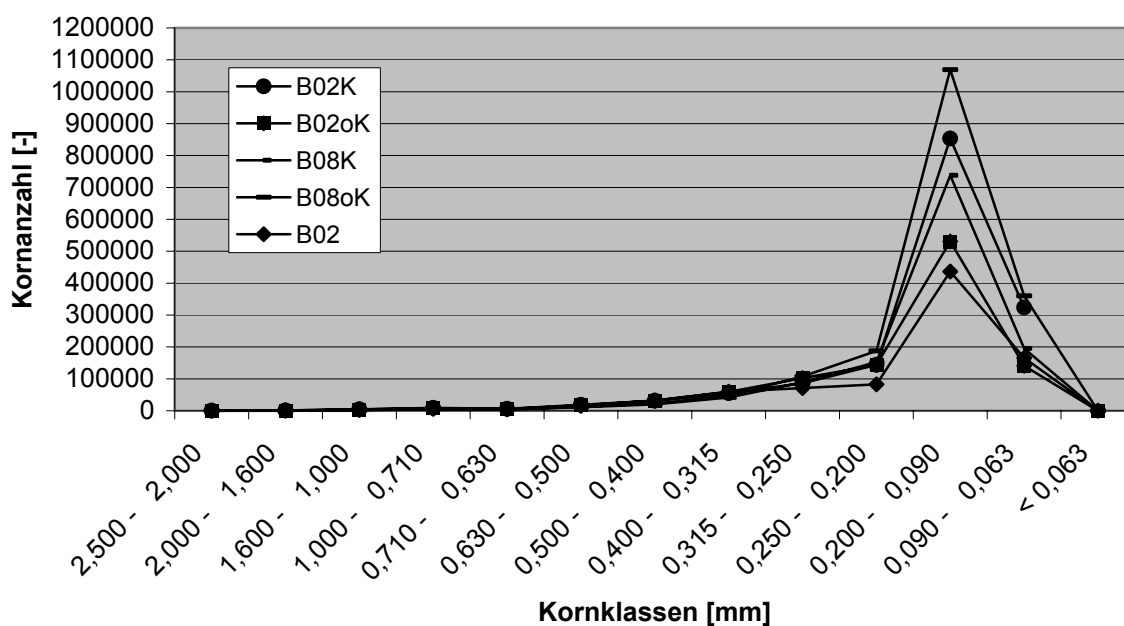
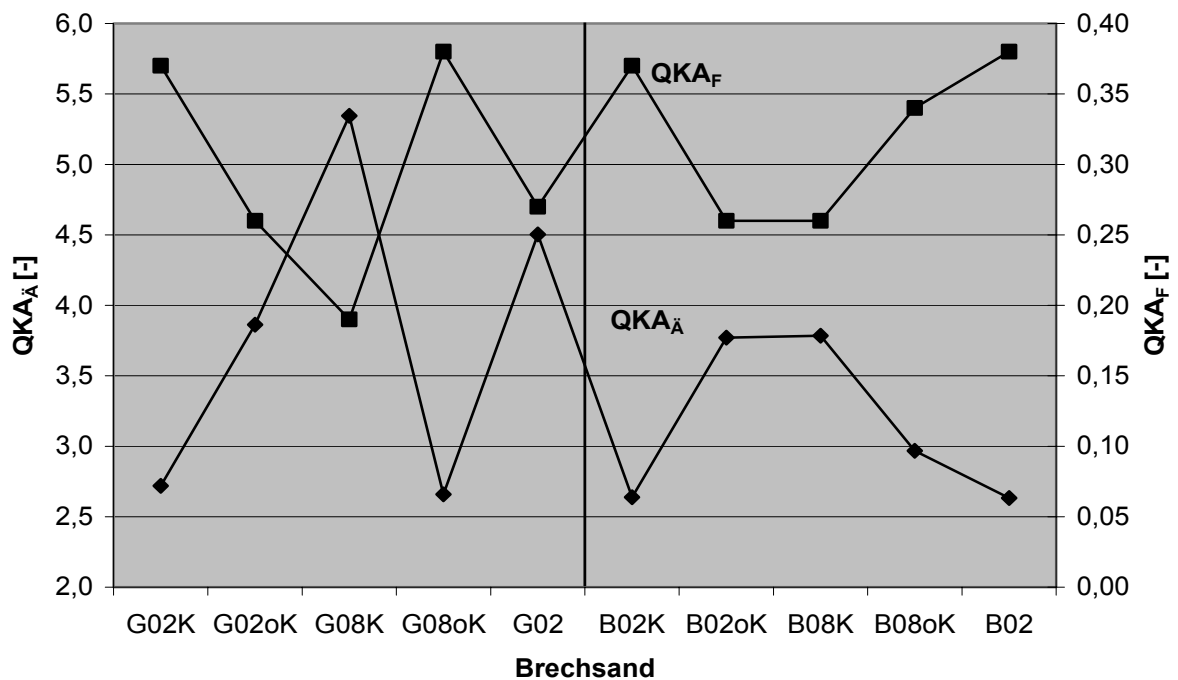


Abbildung 6-15: Kornanzahlverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_{\bar{A}}$ )

Die Brechsande lassen sich durch den Quotienten der Kornanzahlen aus den Kornklassen 0,2/0,09 mm und 0,09/0,063 mm deutlich unterscheiden. Dieser Quotient (Bezeichnung QKA), dessen Größe direkt mit der Qualität der mechanischen Frakti-



onierung der Brechsande zusammenhängt, ist für Grauwacke und Basalt in **Abbildung 6-16** dargestellt.



**Abbildung 6-16: Kornanzahlverteilungsquotient  $QKA_{\delta}$  für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt**

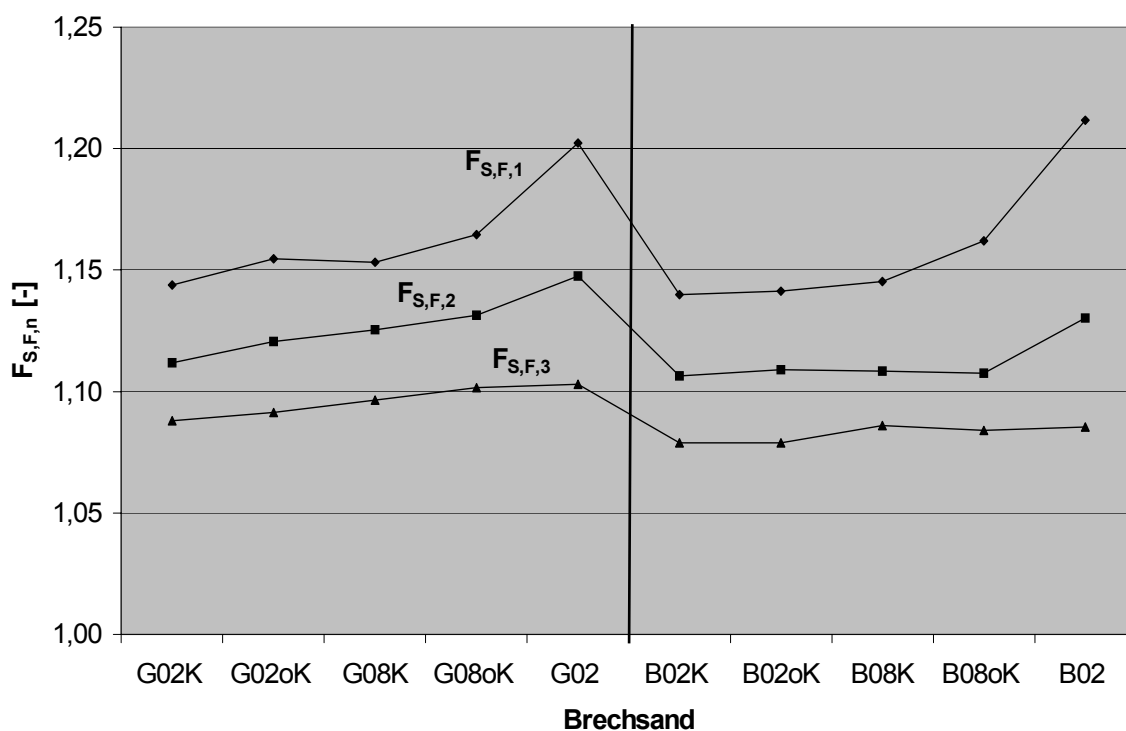
Die Sphäritäten  $F_{S,\delta,n}$  sind in **Anhang 1** in den **Tabellen A1-1** und **A1-2** für die untersuchten Kornklassen aufgeführt und in den **Abbildungen A1-1** und **A1-2** für die Grauwacke- und Basaltbrechsande graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-9** beinhaltet die für die Klärung eines funktionalen Zusammenhangs mit Asphalteigenschaften verwendeten Parametern  $F_{S,\delta,n}$ . In den **Abbildungen 6-17** und **6-18** sind diese graphisch dargestellt.

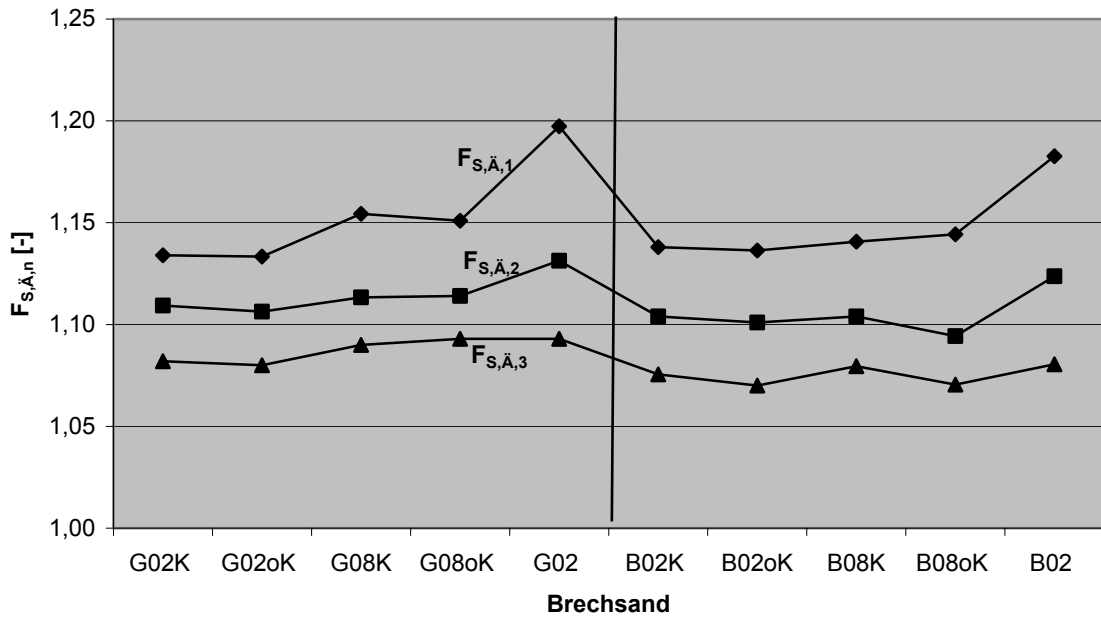
Die in Abschnitt 5 erläuterte Korrelationsanalyse ist in **Anhang 1** dokumentiert.

**Tabelle 6-9: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{S,\delta,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand**

Parameter	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
$F_{S,F,1}$	1,144	1,155	1,153	1,165	1,202	1,140	1,141	1,145	1,162	1,212
$F_{S,F,2}$	1,112	1,121	1,125	1,131	1,148	1,106	1,109	1,108	1,108	1,130
$F_{S,F,3}$	1,088	1,092	1,097	1,102	1,103	1,079	1,079	1,086	1,084	1,086
$F_{S,\ddot{A},1}$	1,134	1,133	1,154	1,151	1,197	1,138	1,136	1,141	1,144	1,144
$F_{S,\ddot{A},2}$	1,109	1,106	1,113	1,114	1,131	1,104	1,101	1,104	1,094	1,094
$F_{S,\ddot{A},3}$	1,082	1,080	1,090	1,093	1,093	1,076	1,070	1,080	1,071	1,071



**Abbildung 6-17: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{S,F,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand**



**Abbildung 6-18: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{S,Ä,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand**

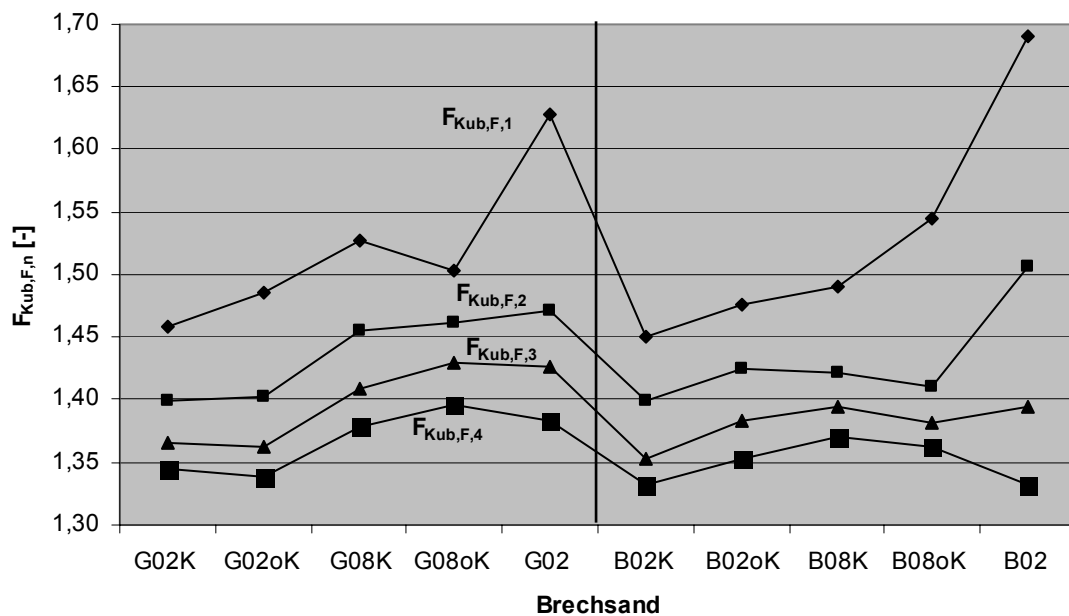
Die Kubizitäten  $F_{Kub,\delta,n}$  sind in **Anhang 2** in den **Tabellen A2-1 und A2-2** für die untersuchten Kornklassen aufgelistet und in den **Abbildungen A2-1 und A2-2** für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-10** beinhaltet die für die Klärung eines funktionalen Zusammenhangs mit Asphalteigenschaften verwendeten Parameter  $F_{Kub,\delta,n}$ . In den **Abbildungen 6-19 und 6-20** sind diese graphisch dargestellt.

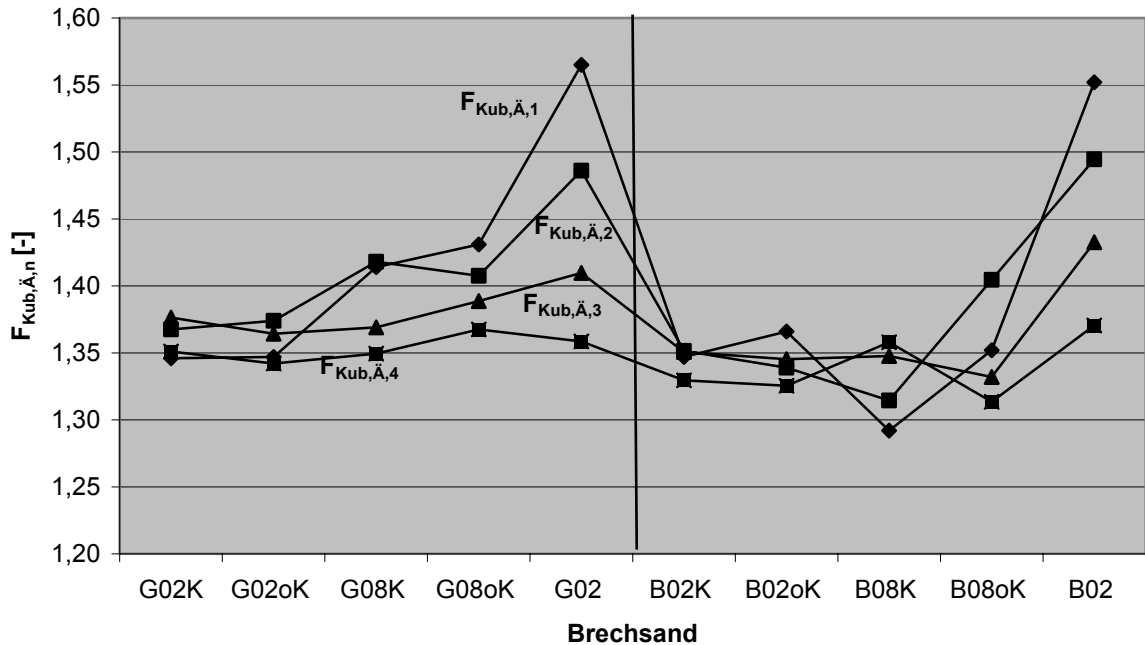
Die in Abschnitt 5 erläuterte Korrelationsanalyse ist in **Anhang 2** dokumentiert.

**Tabelle 6-10: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{Kub,\delta,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsande**

Parameter	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
$F_{Kub,F,1}$	1,459	1,486	1,528	1,504	1,628	1,450	1,476	1,490	1,545	1,690
$F_{Kub,F,2}$	1,400	1,403	1,455	1,461	1,472	1,400	1,426	1,421	1,411	1,506
$F_{Kub,F,3}$	1,365	1,362	1,409	1,43	1,427	1,353	1,383	1,394	1,381	1,395
$F_{Kub,F,4}$	1,344	1,338	1,379	1,396	1,383	1,332	1,352	1,371	1,363	1,332
$F_{Kub,\ddot{A},1}$	1,346	1,347	1,414	1,431	1,565	1,347	1,366	1,292	1,352	1,552
$F_{Kub,\ddot{A},2}$	1,368	1,374	1,418	1,408	1,486	1,352	1,339	1,315	1,405	1,495
$F_{Kub,\ddot{A},3}$	1,376	1,364	1,369	1,389	1,410	1,351	1,345	1,348	1,332	1,433
$F_{Kub,\ddot{A},4}$	1,351	1,342	1,350	1,368	1,359	1,330	1,326	1,358	1,314	1,371



**Abbildung 6-19: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{Kub,F,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand**



**Abbildung 6-20: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{Kub,Ä,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand**

Die Konkavitäten  $F_{Kon,δ,n}$  sind in **Anhang 3** in den **Tabellen A3-1** und **A3-2** für die untersuchten Kornklassen aufgeführt und in den **Abbildungen A3-1** und **A3-2** für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-11** enthält die für die Klärung eines funktionalen Zusammenhangs mit Asphalteigenschaften verwendeten Parameter  $F_{Kon,δ,n}$ . In den **Abbildungen 6-21** und **6-22** sind diese graphisch dargestellt.

Die in Abschnitt 5 erläuterte Korrelationsanalyse ist in **Anhang 3** dokumentiert.

**Tabelle 6-11: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{Kon,δ,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand**

Parameter	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
$F_{Kon,F,1}$	1,528	1,561	1,603	1,582	1,729	1,519	1,542	1,556	1,621	1,819
$F_{Kon,F,2}$	1,459	1,472	1,519	1,529	1,549	1,457	1,482	1,475	1,467	1,577
$F_{Kon,F,3}$	1,405	1,402	1,446	1,472	1,464	1,386	1,412	1,428	1,419	1,407
$F_{Kon,Ä,1}$	1,407	1,396	1,492	1,505	1,661	1,415	1,430	1,416	1,403	1,646
$F_{Kon,Ä,2}$	1,430	1,435	1,492	1,473	1,572	1,410	1,401	1,429	1,468	1,578
$F_{Kon,Ä,3}$	1,427	1,413	1,419	1,439	1,461	1,399	1,391	1,381	1,373	1,479
$F_{Kon,Ä,4}$	1,391	1,383	1,391	1,413	1,399	1,366	1,361	1,360	1,353	1,395

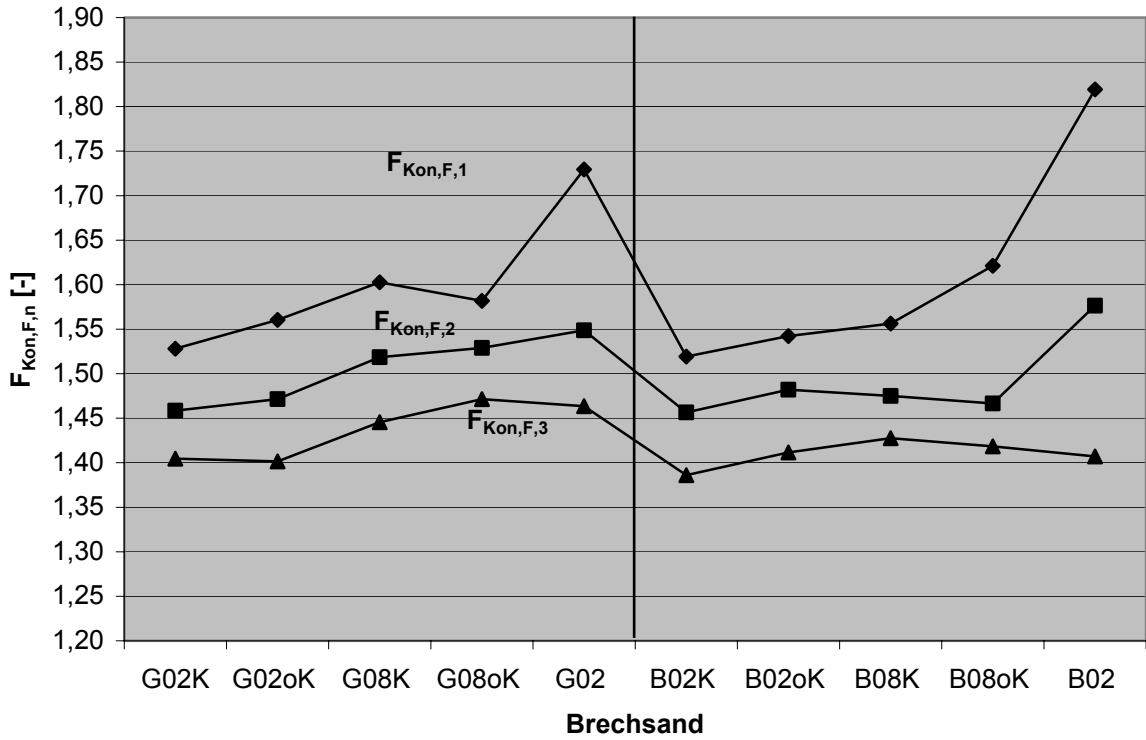


Abbildung 6-21: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{Kon,F,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand

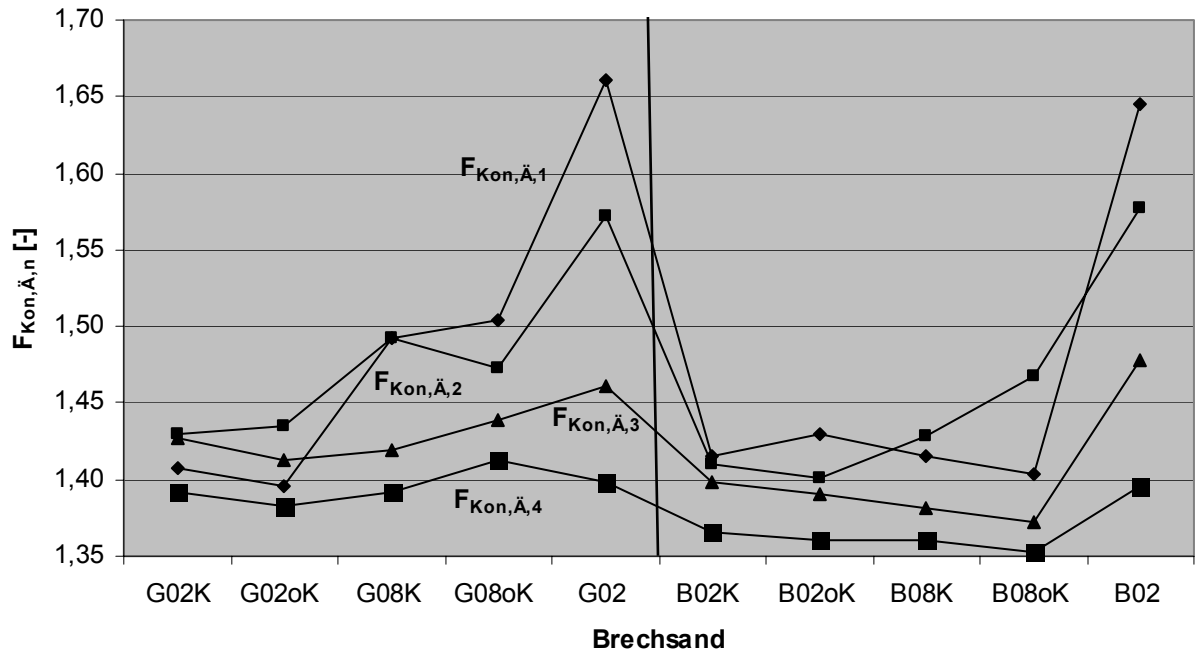


Abbildung 6-22: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter  $F_{Kon,Ä,n}$  für Grauwacke- und Basaltbrechsand

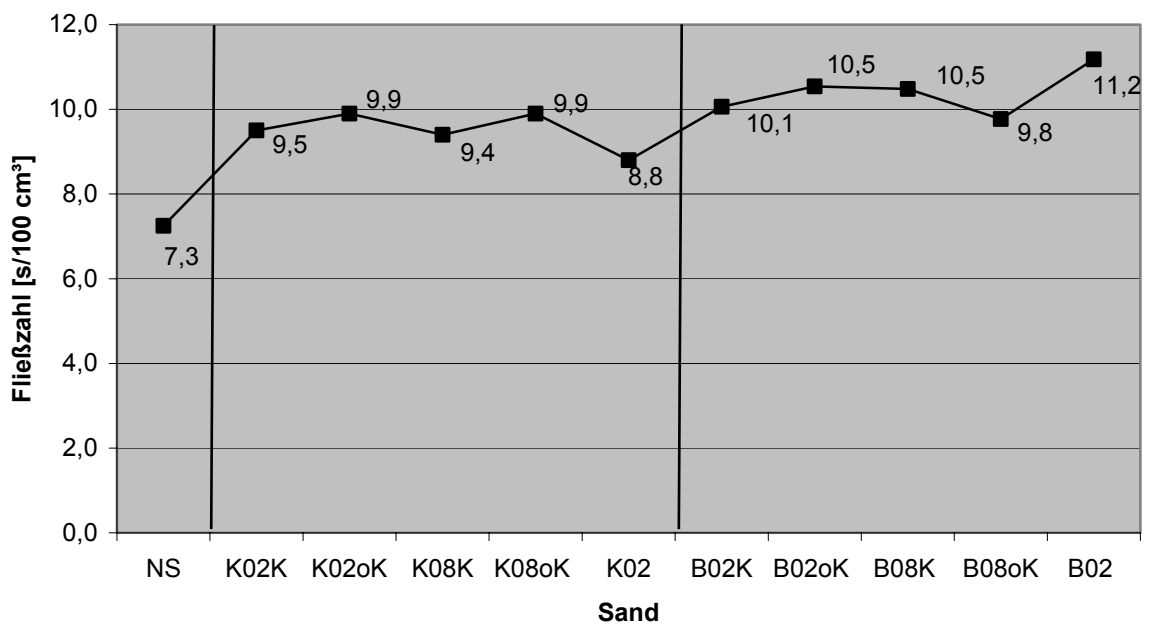
## 6.2 Ergebnisse der Untersuchungen an den Sanden zur Verwendung in Beton

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Basaltbrechsande aus dem vorangegangenen Abschnitt mit aufgeführt, um den direkten Vergleich mit den anderen Sanden zu ermöglichen.

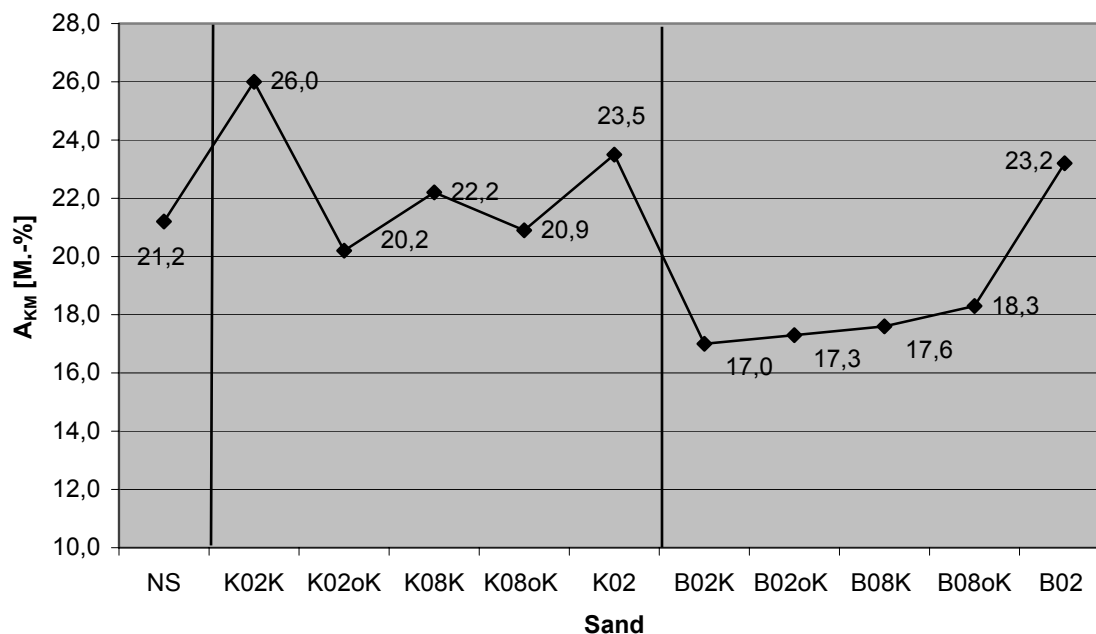
Die Rohdichte  $\rho_{R,M}$  der Sande wurde für Natursand zu  $2,633 \text{ g/cm}^3$ , für Kalkstein zu  $2,725 \text{ g/cm}^3$  und für Basalt zu  $3,050 \text{ g/cm}^3$  bestimmt.

### 6.2.1 Mechanische Eigenschaften des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande

Die Fließzahlen der untersuchten Sande sind in **Abbildung 6-23** dargestellt. Die Abriebwerte der Sande in der Kugelmühle enthält **Abbildung 6-24**.



**Abbildung 6-23: Fließzahl von Natursand sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**



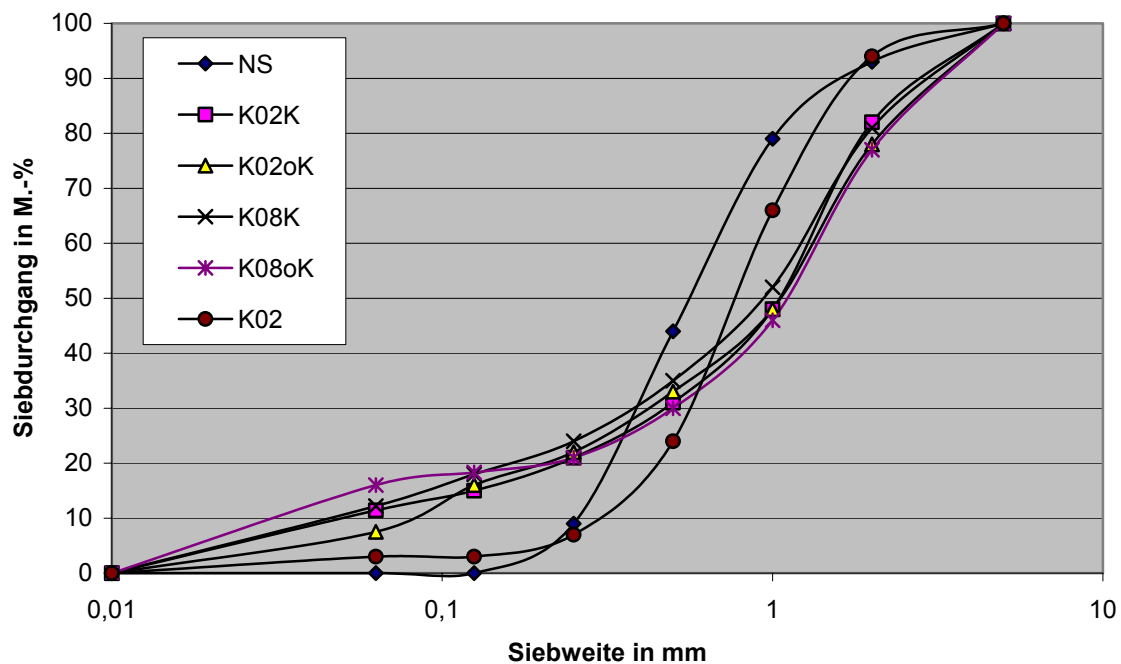
**Abbildung 6-24: Abrieb in der Kugelmühle von Natursand sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

**Tabelle 6-12** enthält die Angaben zur Korngrößenverteilung des Natursandes und der Kalkstein- und Basaltbrechsande. In **Abbildung 6-25** und **Abbildung 6-26** sind diese graphisch dargestellt.

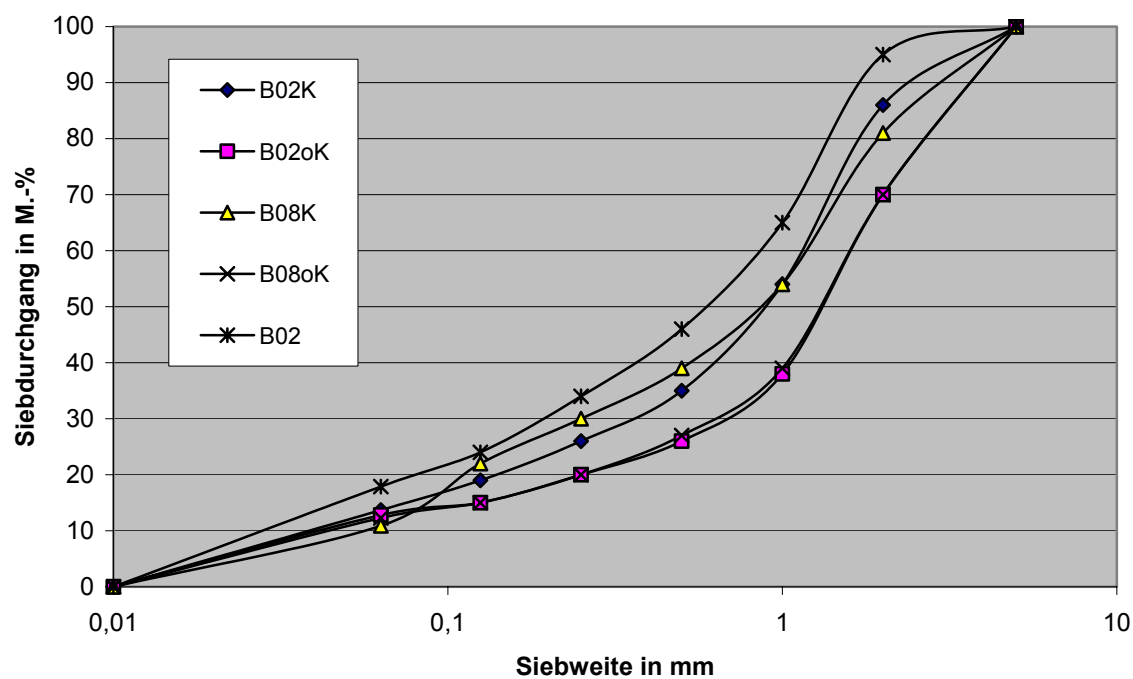
**Tabelle 6-12: Korngrößenverteilung des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

Sieb- weite [mm]	Durchgang [M.-%]										
	NS	K02K	K02oK	K08K	K08oK	K02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
<b>2,0</b>	93,0	72,0	78,0	81,0	77,0	94,0	86,0	70,0	81,0	70,0	95,0
<b>1,0</b>	79,0	48,0	48,0	52,0	46,0	66,0	54,0	38,0	54,0	39,0	65,0
<b>0,5</b>	44,0	31,0	33,0	35,0	30,0	24,0	35,0	26,0	39,0	27,0	46,0
<b>0,25</b>	9,0	21,0	22,0	24,0	21,0	7,0	26,0	20,0	30,0	20,0	34,0
<b>0,125</b>	0,0	15,0	16,0	18,0	18,3	3,0	19,0	15,0	22,0	15,0	24,0
<b>0,063</b>	0,0	11,4	7,5	12,2	16	2,0	13,7	12,8	10,9	12,3	17,9



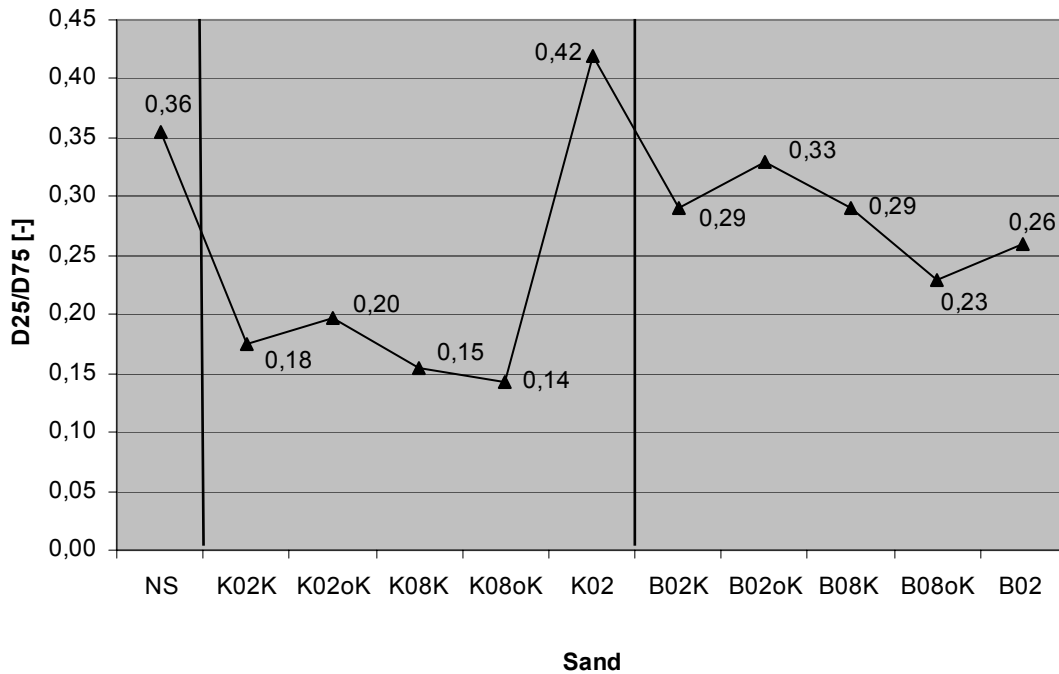


**Abbildung 6-25: Korngrößenverteilung des Natursandes und der Kalksteinbrechsande**



**Abbildung 6-26: Korngrößenverteilung der Basaltbrechsande**

In **Abbildung 6-27** sind die Ungleichförmigkeitszahlen  $D_{25}/D_{75}$  für den Natursand sowie für die Kalkstein- und Basaltbrechsande graphisch dargestellt.



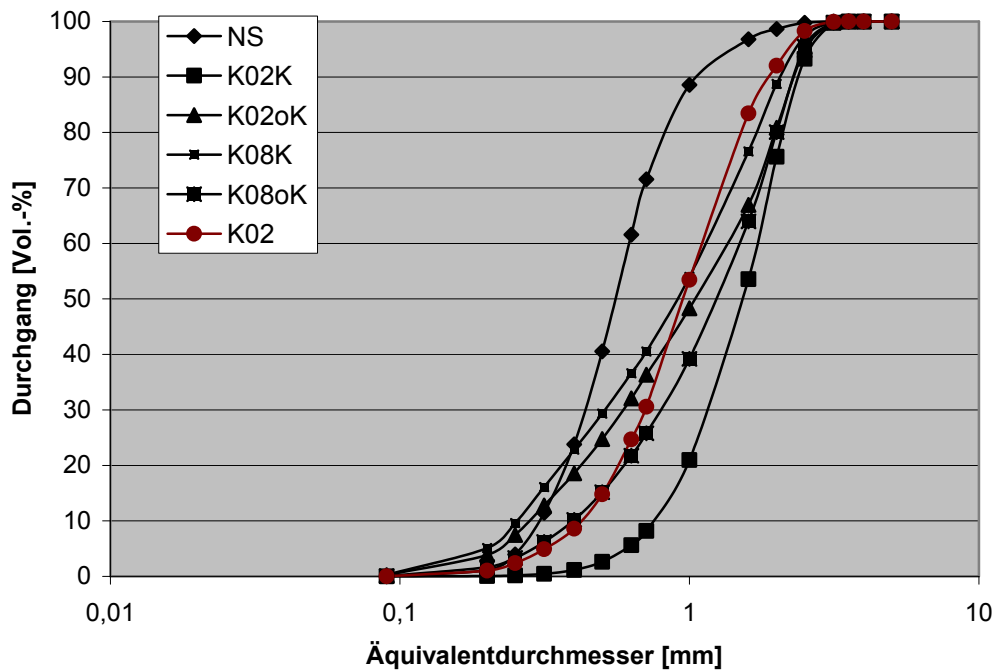
**Abbildung 6-27: Ungleichförmigkeit  $D_{25}/D_{75}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

### 6.2.2 Ergebnisse der photooptischen Untersuchungen

Die photooptische Analyse der Korngrößenverteilung erfolgte an der Kornklasse 0,09/2 mm, also nicht am Überkornanteil. Die festgestellten Korngrößenverteilungen sind in den **Tabellen 6-13** und **6-14** sowie in den **Abbildungen 6-28** und **6-29** für den Natursand und die Kalksteinbrechsande dargestellt. Die entsprechenden Darstellungen für die Basaltbrechsande enthalten die **Abbildungen 6-5** und **6-7**.







**Abbildung 6-29: Korngößenverteilung ( $\delta = d_{\text{Ä}}$ ) des Natursandes sowie der Kalksteinbrechsande**

Zur numerischen Darstellung der Unterschiede der untersuchten Korngößenverteilungen wurden die experimentell gefundenen Korngößenverteilungen mit der Potenzverteilung gemäß Gleichung (6-1) und mit der RRSB-Verteilung gemäß Gleichung (6-2) approximiert.

Mittels bivariater Korrelationsanalyse wurde eine der beiden Verteilungen zur Approximation qualifiziert. Die Tabellen 6-15 und 6-16 enthalten die bivariaten Bestimmtheitsmaße der beiden Verteilungen mit den Analysewerten. Die aufgeführten Exponenten „n“ und „m“ ergaben dabei die größtmögliche Näherung zu den Analysewerten.

Als Beurteilungskriterium wurde die Summe der quadratischen Abweichungen verwendet. Die RRSB-Verteilung korreliert in allen Fällen besser als die Potenzverteilung. Somit eignet sich der Exponent „n“ der RRSB-Verteilung als beschreibender Parameter der photooptischen Korngößenverteilung besser als der Exponent „m“ der Potenzverteilung.

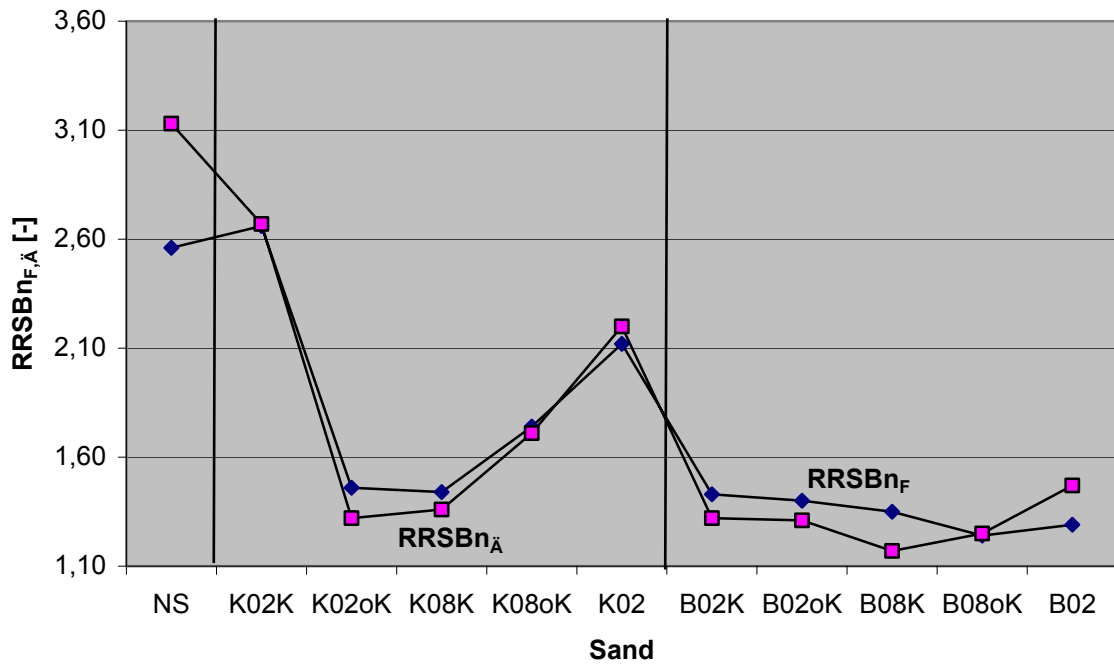
**Tabelle 6-15: Bivariate Bestimmtheitsmaße für die Approximation ( $\delta=d_F$ ) bei Natursand sowie bei den Kalkstein- und Basaltbrechsanden**

Sand	RRSB/po	n	Potenz/po	m
NS	0,994	2,56	0,910	0,67
K02K	0,998	2,66	0,966	2,57
K02oK	0,998	1,46	0,976	1,4
K08K	0,997	1,44	0,982	1,14
K08oK	0,999	1,74	0,976	1,63
K02	0,999	2,12	0,973	1,28
B02K	0,998	1,43	0,990	0,63
B02oK	0,996	1,40	0,990	0,61
B08K	0,996	1,35	0,992	0,66
B08oK	0,996	1,24	0,988	0,48
B02	0,992	1,29	0,986	0,55

**Tabelle 6-16: Bivariate Bestimmtheitsmaße für die Approximation ( $\delta = d_{\Delta}$ ) bei Natursand sowie bei den Kalkstein- und Basaltbrechsanden**

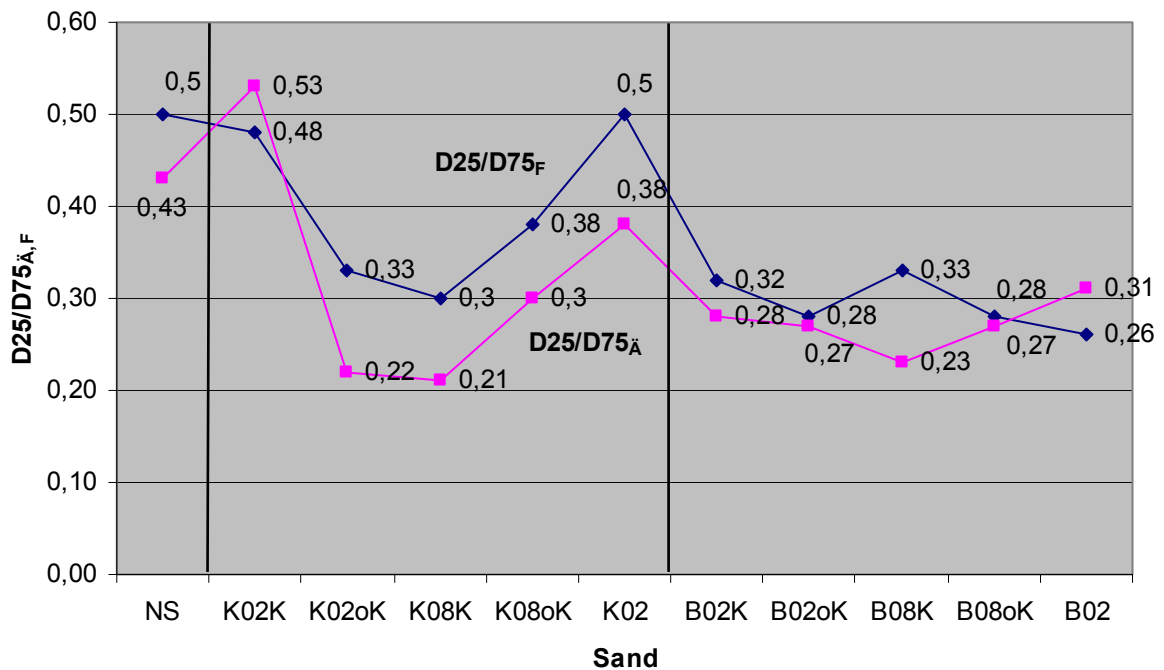
Sand	RRSB/po	n	Potenz/po	m
NS	0,994	3,13	0,873	0,6
K02K	1,000	2,67	0,986	1,67
K02oK	0,994	1,32	0,985	0,91
K/8K	0,996	1,36	0,984	0,79
K08oK	0,997	1,71	0,992	1,13
K02	0,999	2,2	0,964	0,97
B02K	0,998	1,32	0,985	0,76
B02oK	0,995	1,31	0,981	0,78
B08K	0,995	1,17	0,984	0,73
B08oK	0,993	1,25	0,943	0,53
B02	0,993	1,47	0,958	0,68

In **Abbildung 6-30** sind die Parameter „n“ der untersuchten Brechsande vergleichend dargestellt.



**Abbildung 6-30: Vergleich der RRSBn-Parameter bei Natursand sowie bei den Kalkstein- und Basaltbrechsanden**

Die Verteilungsparameter  $D_{25}/D_{75}$  sind in **Abbildung 6-31** für den Natursand sowie die Kalkstein- und Basaltbrechsande graphisch dargestellt.



**Abbildung 6-31: Vergleich der  $D_{25}/D_{75}$ -Parameter für den Natursand sowie die Kalkstein- und Basaltbrechsande**







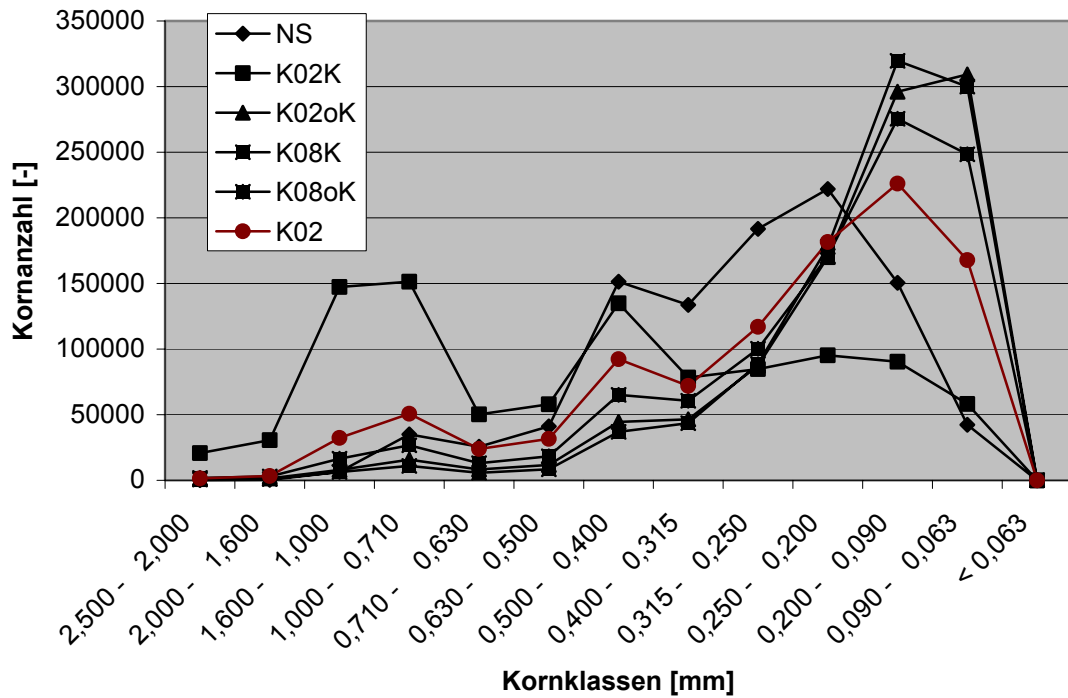


Abbildung 6-32: Kornanzahlverteilung des Natursandes und des Kalksteinbrechsandes ( $\delta = d_F$ )

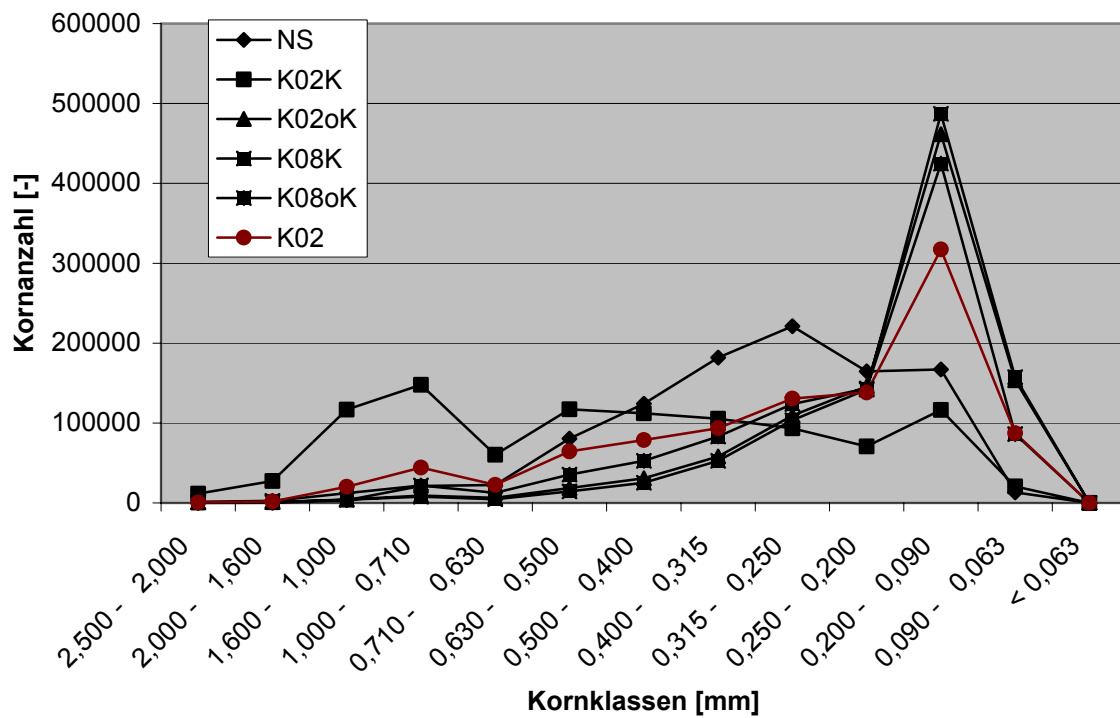


Abbildung 6-33: Kornanzahlverteilung des Natursandes und des Kalksteinbrechsandes ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )

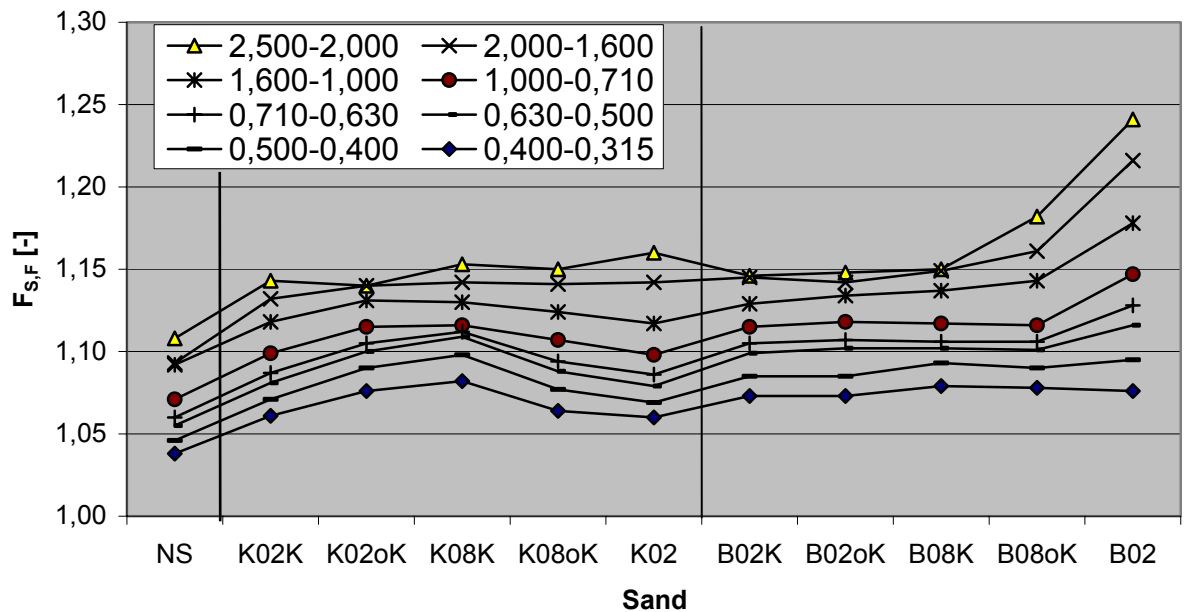
Die **Tabellen 6-19** und **6-20** enthalten die Sphärizitäten  $F_{S,\delta,n}$  der für die Betonuntersuchungen verwendeten Sande. In **Abbildung 6-34** und **Abbildung 6-35** sind diese graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-19: Sphärizitäten  $F_{S,F}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

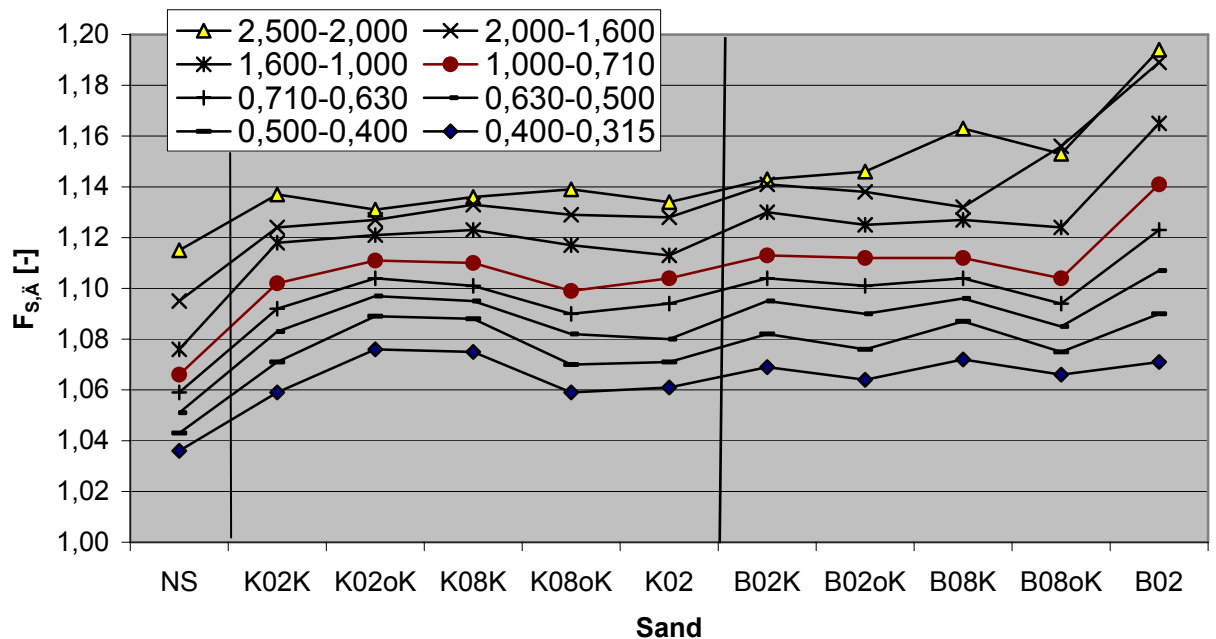
Kornklasse	Sphärizität $F_{S,F}$										
	NS	K02K	K02oK	K08K	K08oK	K02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,108	1,143	1,140	1,153	1,150	1,160	1,146	1,148	1,150	1,182	1,241
2,000-1,600	1,093	1,132	1,140	1,142	1,141	1,142	1,145	1,142	1,149	1,161	1,216
1,600-1,000	1,092	1,118	1,131	1,130	1,124	1,117	1,129	1,134	1,137	1,143	1,178
1,000-0,710	1,071	1,099	1,115	1,116	1,107	1,098	1,115	1,118	1,117	1,116	1,147
0,710-0,630	1,060	1,087	1,105	1,112	1,094	1,086	1,105	1,107	1,106	1,106	1,128
0,630-0,500	1,055	1,081	1,100	1,109	1,088	1,079	1,099	1,102	1,102	1,101	1,116
0,500-0,400	1,046	1,071	1,090	1,098	1,077	1,069	1,085	1,085	1,093	1,090	1,095
0,400-0,315	1,038	1,061	1,076	1,082	1,064	1,060	1,073	1,073	1,079	1,078	1,076

**Tabelle 6-20: Sphärizitäten  $F_{S,\ddot{A}}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

Kornklasse	Sphärizität $F_{S,\ddot{A}}$										
	NS	K02K	K02oK	K08K	K08oK	K02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,115	1,137	1,131	1,136	1,139	1,134	1,134	1,146	1,163	1,153	1,194
2,000-1,600	1,095	1,124	1,127	1,133	1,129	1,128	1,128	1,138	1,132	1,156	1,189
1,600-1,000	1,076	1,118	1,121	1,123	1,117	1,113	1,113	1,125	1,127	1,124	1,165
1,000-0,710	1,066	1,102	1,111	1,110	1,099	1,104	1,104	1,112	1,112	1,104	1,141
0,710-0,630	1,059	1,092	1,104	1,101	1,090	1,094	1,094	1,101	1,104	1,094	1,123
0,630-0,500	1,051	1,083	1,097	1,095	1,082	1,080	1,080	1,09	1,096	1,085	1,107
0,500-0,400	1,043	1,071	1,089	1,088	1,070	1,071	1,071	1,076	1,087	1,075	1,09
0,400-0,315	1,036	1,059	1,076	1,075	1,059	1,061	1,061	1,064	1,072	1,066	1,071



**Abbildung 6-34:** Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Sphärizitäten  $F_{S,F,n}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande



**Abbildung 6-35:** Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Sphärizitäten  $F_{S,Ä,n}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande

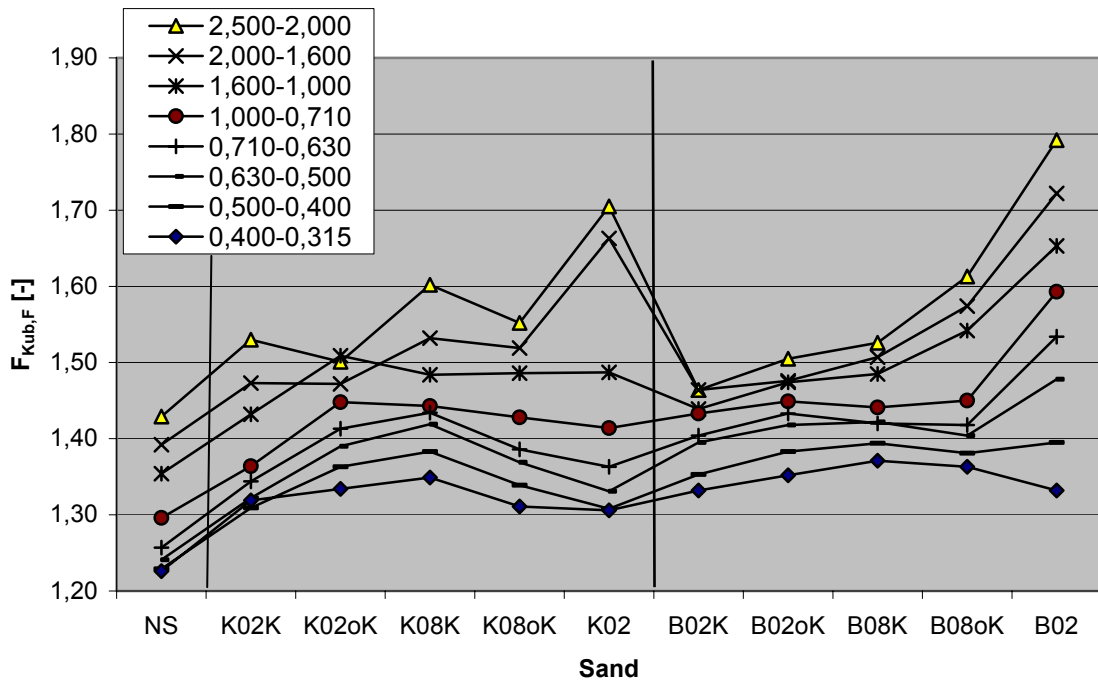
Die **Tabellen 6-21** und **6-22** enthalten die Kubizitäten  $F_{Kub,\delta,n}$  der für die Betonuntersuchungen verwendeten Sande. In den **Abbildungen 6-36** und **6-37** sind diese graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-21: Kubizitäten  $F_{Kub,F}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsand**

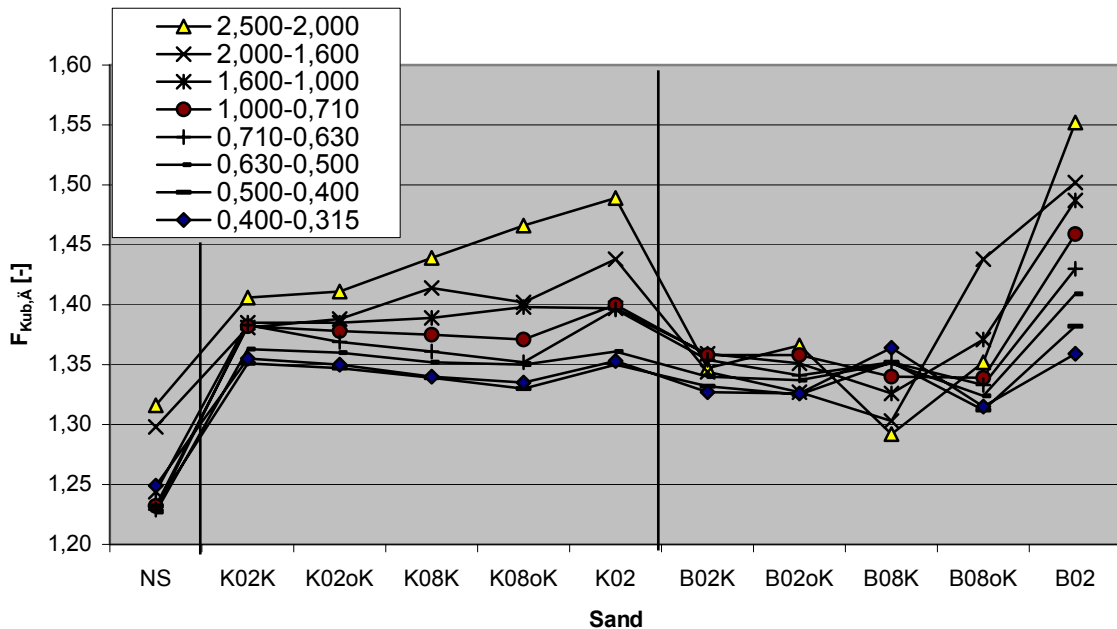
Kornklasse	Kubizität $F_{Kub,F}$										
	NS	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,429	1,530	1,501	1,602	1,552	1,705	1,464	1,505	1,526	1,613	1,792
2,000-1,600	1,392	1,473	1,472	1,532	1,519	1,663	1,464	1,476	1,507	1,574	1,722
1,600-1,000	1,354	1,432	1,509	1,484	1,486	1,487	1,439	1,474	1,485	1,542	1,653
1,000-0,710	1,296	1,364	1,448	1,443	1,428	1,414	1,433	1,449	1,441	1,45	1,593
0,710-0,630	1,257	1,344	1,413	1,434	1,386	1,363	1,404	1,433	1,42	1,418	1,534
0,630-0,500	1,241	1,322	1,390	1,419	1,369	1,331	1,395	1,418	1,422	1,404	1,478
0,500-0,400	1,229	1,309	1,363	1,383	1,339	1,308	1,353	1,383	1,394	1,381	1,395
0,400-0,315	1,226	1,319	1,334	1,349	1,311	1,306	1,332	1,352	1,371	1,363	1,332

**Tabelle 6-22: Kubizitäten  $F_{Kub,\ddot{A}}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

Kornklasse	Kubizität $F_{Kub,\ddot{A}}$										
	NS	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,316	1,406	1,411	1,439	1,466	1,489	1,347	1,366	1,292	1,352	1,552
2,000-1,600	1,298	1,381	1,388	1,414	1,402	1,438	1,344	1,327	1,303	1,438	1,502
1,600-1,000	1,244	1,385	1,385	1,389	1,398	1,397	1,359	1,351	1,326	1,371	1,487
1,000-0,710	1,232	1,382	1,378	1,375	1,371	1,400	1,358	1,358	1,340	1,339	1,459
0,710-0,630	1,229	1,383	1,369	1,361	1,352	1,396	1,354	1,341	1,352	1,333	1,430
0,630-0,500	1,227	1,363	1,360	1,352	1,350	1,361	1,340	1,337	1,351	1,324	1,409
0,500-0,400	1,232	1,351	1,347	1,339	1,330	1,350	1,332	1,325	1,352	1,312	1,382
0,400-0,315	1,249	1,355	1,350	1,340	1,335	1,353	1,327	1,326	1,364	1,315	1,359



**Abbildung 6-36: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Kubizitäten  $F_{Kub,F}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**



**Abbildung 6-37: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Kubizitäten  $F_{Kub,Ä}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

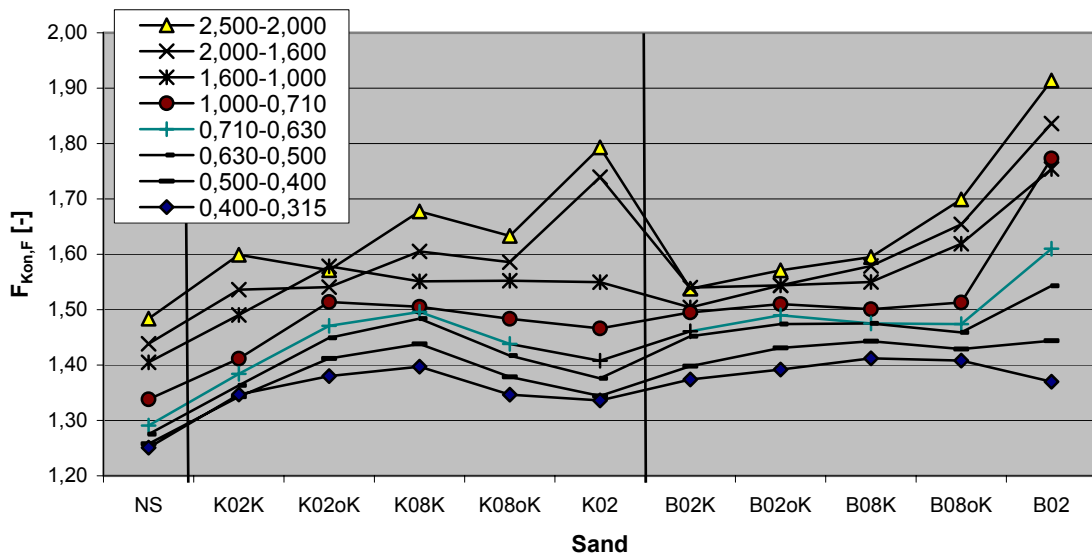
Die **Tabellen 6-23** und **6-24** enthalten die Konkavitäten  $F_{Kon,\delta,n}$  der für die Betonuntersuchungen verwendeten Sande. In den **Abbildungen 6-38** und **6-39** sind diese graphisch dargestellt.

**Tabelle 6-23: Konkavitäten  $F_{Kon,F}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

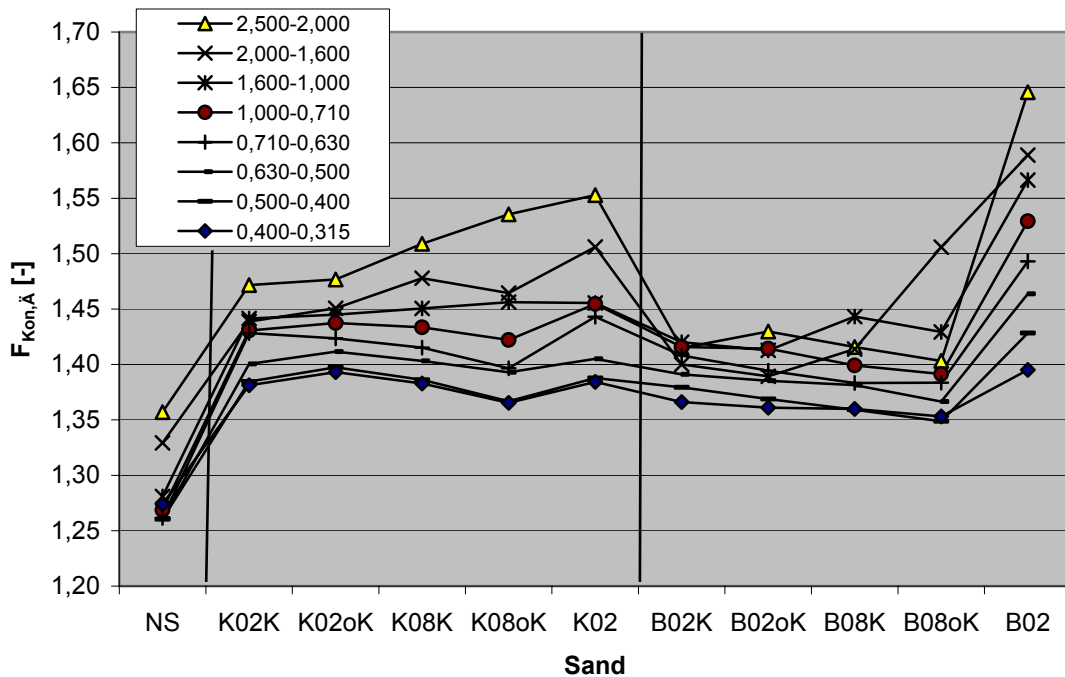
Kornklasse	Konkavität $F_{Kon,F}$										
	NS	K02K	K02oK	K08K	K08oK	K02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,484	1,599	1,572	1,677	1,633	1,793	1,538	1,571	1,595	1,699	1,914
2,000-1,600	1,438	1,536	1,541	1,605	1,586	1,739	1,540	1,544	1,579	1,654	1,836
1,600-1,000	1,405	1,490	1,578	1,551	1,552	1,550	1,504	1,544	1,550	1,619	1,754
1,000-0,710	1,338	1,412	1,514	1,505	1,484	1,466	1,495	1,510	1,501	1,513	1,773
0,710-0,630	1,291	1,384	1,471	1,496	1,438	1,408	1,461	1,490	1,475	1,474	1,610
0,630-0,500	1,275	1,363	1,449	1,484	1,417	1,376	1,452	1,474	1,475	1,459	1,543
0,500-0,400	1,258	1,343	1,412	1,438	1,379	1,344	1,398	1,431	1,443	1,429	1,444
0,400-0,315	1,251	1,347	1,380	1,397	1,346	1,336	1,374	1,392	1,412	1,408	1,370

**Tabelle 6-24: Konkavitäten  $F_{Kon,\ddot{A}}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**

Kornklasse	Konkavität $F_{Kon,\ddot{A}}$										
	NS	K02K	K02oK	K08K	K08oK	K02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,357	1,472	1,477	1,509	1,536	1,553	1,415	1,430	1,416	1,403	1,646
2,000-1,600	1,329	1,439	1,451	1,478	1,464	1,506	1,400	1,389	1,414	1,506	1,589
1,600-1,000	1,281	1,442	1,445	1,451	1,456	1,455	1,420	1,413	1,443	1,429	1,566
1,000-0,710	1,269	1,431	1,437	1,434	1,422	1,455	1,416	1,414	1,399	1,391	1,529
0,710-0,630	1,262	1,428	1,423	1,415	1,397	1,443	1,408	1,394	1,383	1,384	1,493
0,630-0,500	1,261	1,401	1,412	1,403	1,393	1,405	1,391	1,385	1,381	1,366	1,464
0,500-0,400	1,260	1,385	1,397	1,386	1,367	1,388	1,379	1,369	1,359	1,349	1,428
0,400-0,315	1,274	1,381	1,393	1,383	1,365	1,384	1,366	1,361	1,360	1,353	1,395



**Abbildung 6-38: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Konkavitäten  $F_{Kon,F}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**



**Abbildung 6-39: Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Konkavitäten  $F_{Kon,Ä}$  des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande**



## 7 Ergebnisse der Asphaltuntersuchungen

### 7.1 Hohlraumgehalt und fiktiver Hohlraumgehalt

Die Asphaltbetone wurden mit drei verschiedenen Bindemittelgehalten hergestellt, deren Hohlraumgehalte in **Tabelle 7-1** angegeben und in **Abbildung 7-1** graphisch dargestellt sind.

Die Splittmastixasphalte wurden für die Grauwacke- und Basaltbrechsande mit jeweils unterschiedlichen Bindemittelgehalten hergestellt. Dabei ergaben sich die in **Tabelle 7-2** angegebenen und in **Abbildung 7-2** graphisch dargestellten Hohlraumgehalte.

**Tabelle 7-1: Hohlraumgehalte der Asphaltbetone**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
6,5	3,4	3,5	3,2	4,1	3,6	3,4	3,4	3,5	3,5	3,9
5,9	3,8	4,0	4,3	3,9	5,2	3,8	4,6	4,6	4,8	5,4
5,6	3,6	4,5	4,8	4,6	5,9	4,1	5,3	5,2	5,2	6,5

**Tabelle 7-2: Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
7,0	2,9	2,8	3,1	2,7	2,9	3,3	3,2	3,4	3,2	2,8
6,5	3,1	3,3	3,4	3,4	3,4	3,2	3,6	3,5	3,5	3,7
6,1	3,5	3,4	4,0	3,8	4,7					
6,0						6,2	5,5	5,5	5,1	6,1
5,8	5,3	4,8	4,9	4,7	5,6					

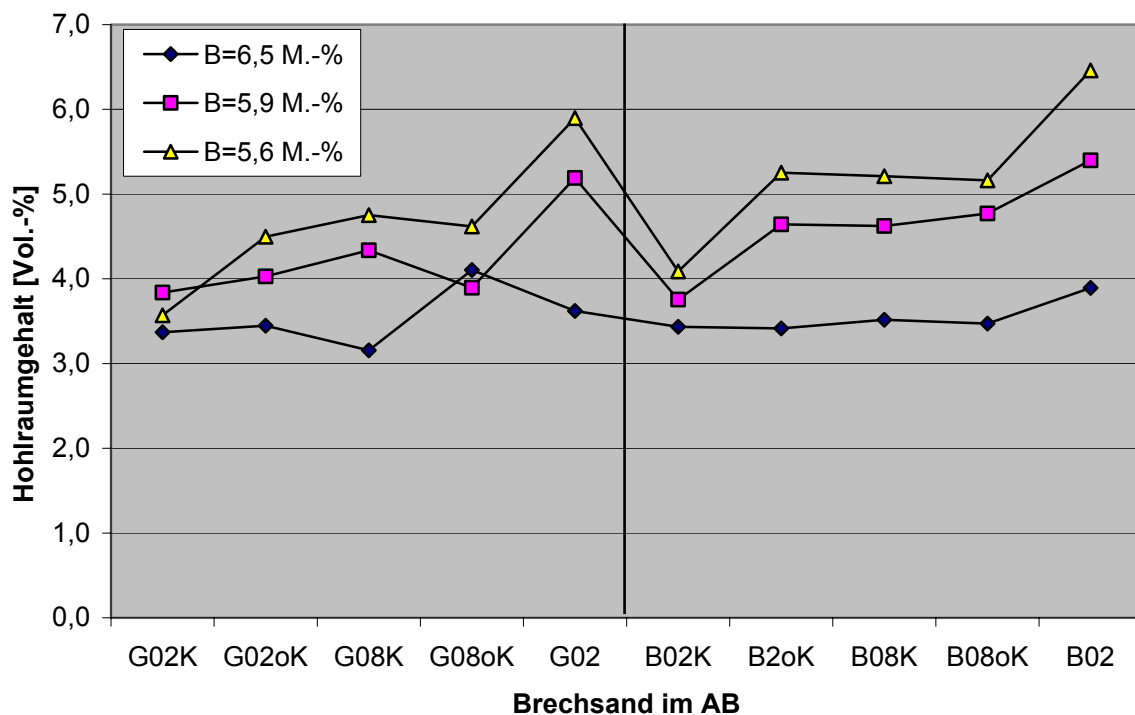


Abbildung 7-1: Hohlraumgehalte der Asphaltbetone

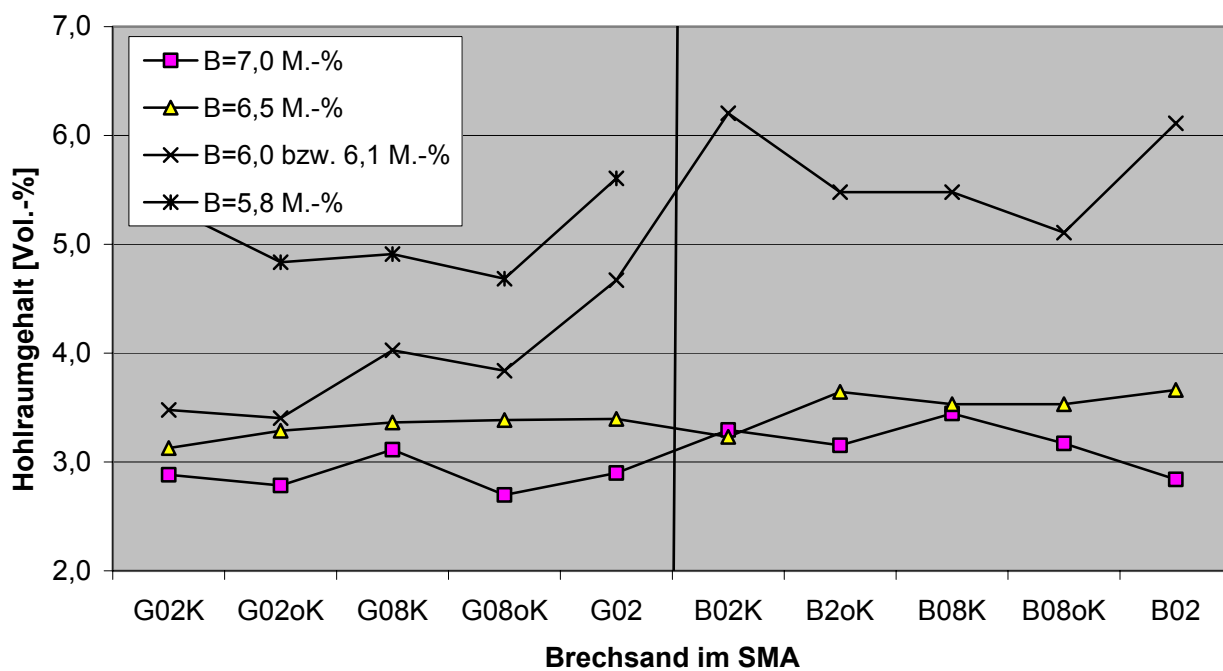


Abbildung 7-2: Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte

Die rechnerisch ermittelten fiktiven Hohlraumgehalte der Mineralstoffgemische der untersuchten Asphaltbetone sind in **Tabelle 7-3** angegeben und in **Abbildung 7-3** graphisch dargestellt.

Die entsprechenden Werte der untersuchten Splittmastixasphalte enthält **Tabelle 7-4** und sind in **Abbildung 7-4** graphisch dargestellt.

Die fiktiven Hohlraumgehalte der Asphalte mit optimalen Bindemittelgehalten sind in den Tabellen fett gedruckt.

**Tabelle 7-3: Fiktive Hohlraumgehalte der Asphaltbetone**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	Fiktiver Hohlraumgehalt [Vol.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
6,5	19,24	19,31	19,07	19,86	19,45	19,89	19,88	19,96	19,92	20,28
5,9	18,32	18,48	18,74	18,37	19,31	<b>18,80</b>	<b>19,55</b>	<b>19,54</b>	<b>19,66</b>	<b>20,19</b>
5,6	<b>17,42</b>	<b>18,22</b>	<b>18,43</b>	<b>18,32</b>	<b>19,41</b>	18,40	19,39	19,35	19,31	20,41

**Tabelle 7-4: Fiktive Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	Fiktiver Hohlraumgehalt [Vol.-%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
7,0	20,9	20,9	21,1	20,8	21,0	21,6	21,4	21,7	21,5	21,2
6,5	20,1	20,2	20,2	20,3	20,3	<b>20,4</b>	<b>20,7</b>	<b>20,6</b>	<b>20,6</b>	<b>20,8</b>
6,1	<b>19,5</b>	<b>19,4</b>	<b>19,9</b>	<b>19,8</b>	<b>20,5</b>					
6,0						21,8	21,1	21,1	20,8	21,7
5,8	20,4	19,9	20,0	19,8	20,6					

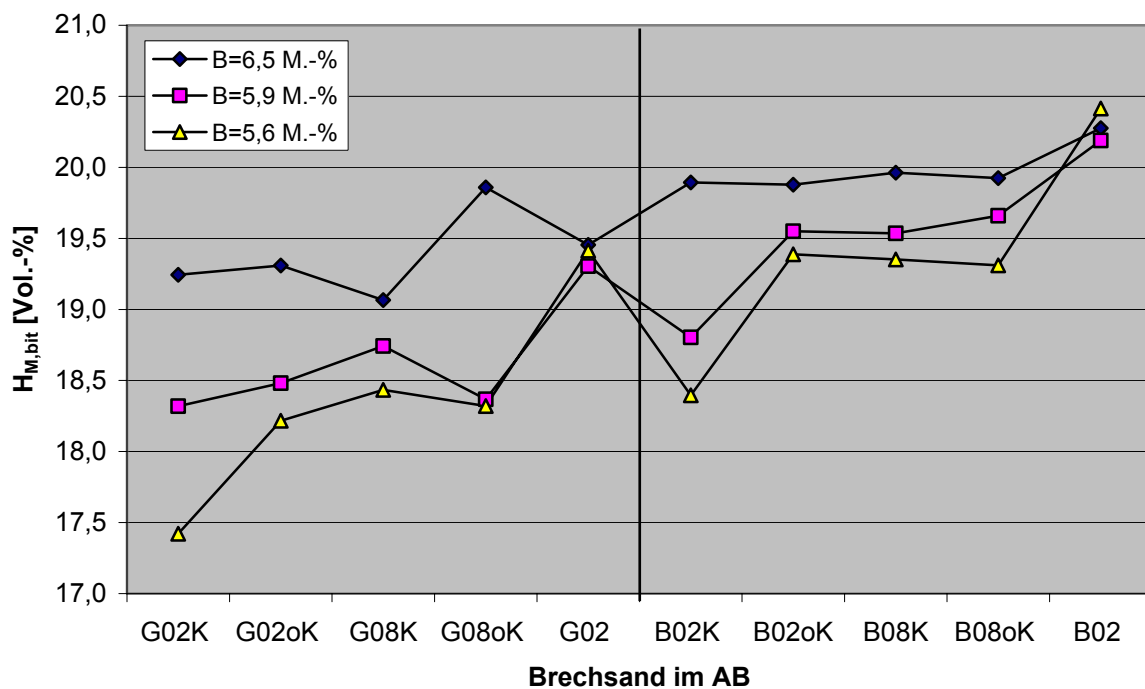


Abbildung 7-3: Fiktive Hohlraumgehalte der Asphaltbetone

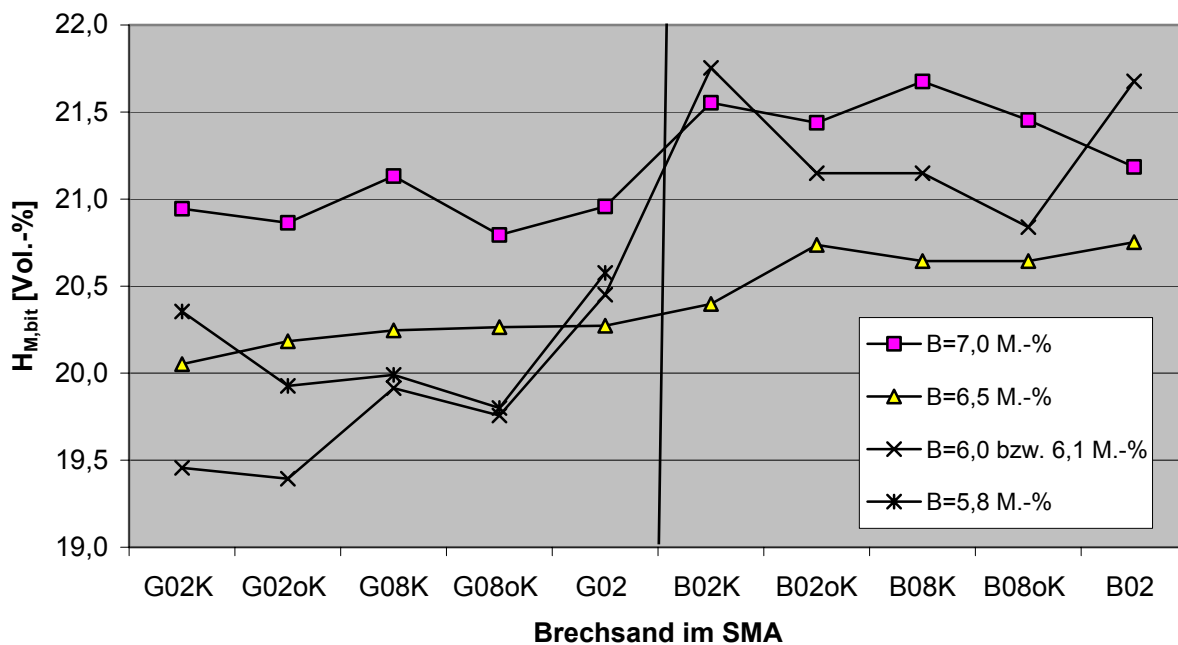


Abbildung 7-4: Fiktive Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte

Um den Einfluss des verwendeten Brechsandes auf den fiktiven Hohlraumgehalt der Mineralstoffgemische numerisch ausdrücken zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit der Gesteinsart des Brechsandes als Faktor durchgeführt. Dabei wurde je Mineralstoffart nur das bezüglich des Bindemittelgehaltes als optimal interpretierte Asphaltgemisch berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3). Bei den Asphaltbetonen mit Grauwackebrechsanden wurde ein Bindemittelgehalt von B=5,6 M.-% und bei solchen mit Basaltbrechsanden von B=5,9 M.-% berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-5** aufgeführt. Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind ausführlich in **Anhang 4** dokumentiert.

**Tabelle 7-5: Einfaktorielle Varianzanalyse der fiktiven Hohlraumgehalte der Asphalte; Faktor: Gesteinsart**

Eigenschaft	Asphaltart	F	Signifikanz
Fiktiver Hohlraumgehalt $H_{M,bit}$	AB 0/11 S	9,386	0,015
	SMA 0/11 S	17,61	0,003

## 7.2 Verformungswiderstand

Die Asphalte wurden mit den als optimal festgelegten Bindemittelgehalten im einaxialen Druckschwellversuch geprüft.

Nahezu alle Splittmastixasphalte waren mit weniger als 10 kLW zerstört. Daher wurde die Dehnung nach 4 kLW als zusätzliches Kriterium gewählt.

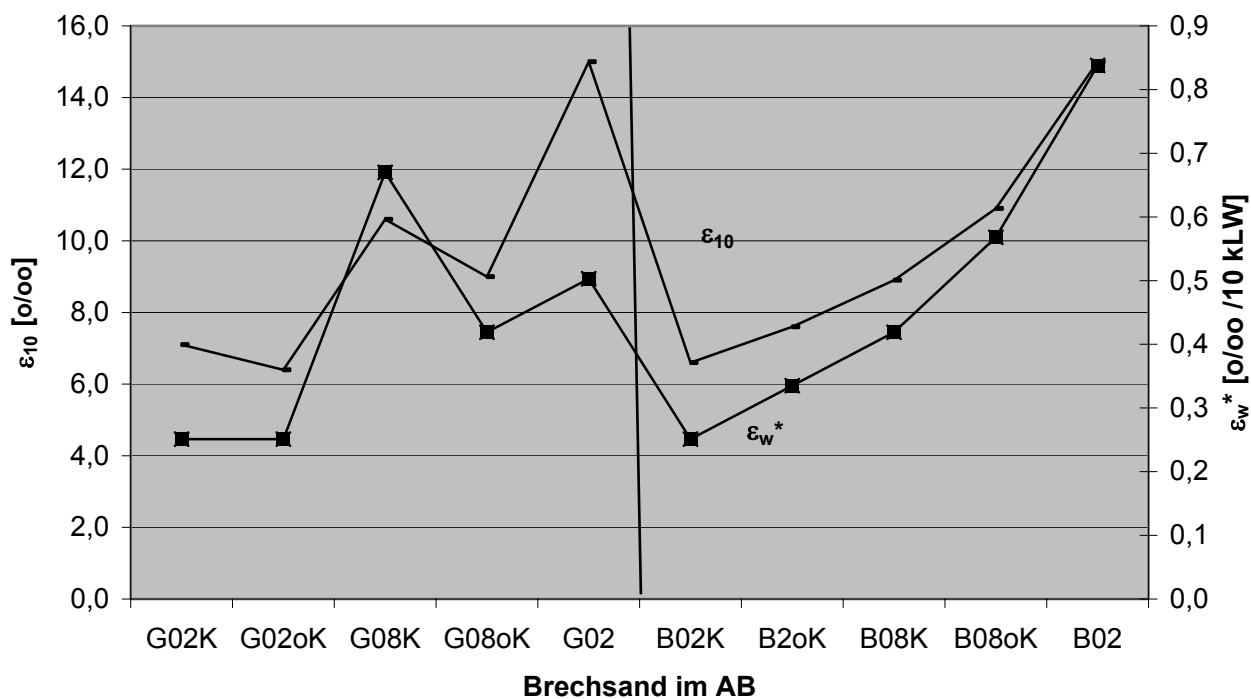
Die Dehnungsrate  $\varepsilon_w^*$  und die Dehnungen  $\varepsilon_{10}$  bzw.  $\varepsilon_4$  nach 10 bzw. 4 kLW sind in den **Tabellen 7-6** und **7-7** angegeben und in den **Abbildungen 7-5** und **7-6** graphisch dargestellt.

**Tabelle 7-6: Verformungseigenschaften der Asphaltbetone im einaxialen Druckschwellversuch**

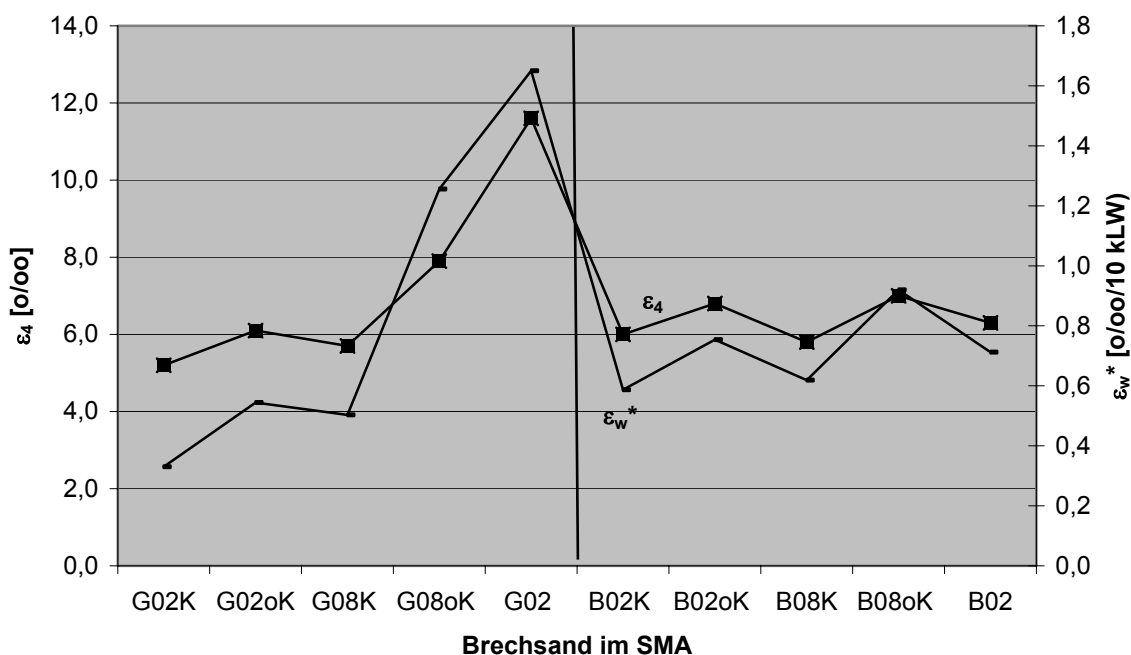
Verformungseigenschaft	Dehnung $\varepsilon_w^*$ [ $^{\circ}/_{00}/10$ kLW] bzw. $\varepsilon_{10}$ [ $^{\circ}/_{00}$ ]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
$\varepsilon_w^*$ bei B=5,6 M.-%	0,251	0,251	0,67	0,419	0,503					
$\varepsilon_w^*$ bei B=5,9 M.-%						0,251	0,335	0,419	0,568	0,838
$\varepsilon_{10}$ bei B=5,6 M.-%	7,1	6,4	10,6	9,0	15,0					
$\varepsilon_{10}$ bei B=5,9 M.-%						6,6	7,6	8,9	10,9	15,0

**Tabelle 7-7: Verformungseigenschaften der Splittmastixasphalte im einaxialen Druckschwellversuch**

Verformungs- eigenschaft	Dehnung $\varepsilon_w^*$ [‰/10 kLW] bzw. $\varepsilon_4$ [‰]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
$\varepsilon_w^*$ bei B=6,0 M.-%	0,33	0,544	0,503	1,256	1,65					
$\varepsilon_w^*$ bei B=6,5 M.-%						0,587	0,754	0,619	0,92	0,712
$\varepsilon_4$ bei B=6,0 M.-%	5,2	6,1	5,7	7,9	11,6					
$\varepsilon_4$ bei B=6,5 M.-%						6,0	6,8	5,8	7,0	6,3



**Abbildung 7-5: Verformungseigenschaften der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt im einaxialen Druckschwellversuch**



**Abbildung 7-6: Verformungseigenschaften der Splittmastixasphalte mit optimalem Bindemittelgehalt im einaxialen Druckschwellversuch**

Um den Einfluss des verwendeten Brechsandes auf die Verformungseigenschaften der untersuchten Asphalte numerisch ausdrücken zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit der Gesteinsart des Brechsandes als Faktor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-8** aufgeführt.

**Tabelle 7-8: Einfaktorielle Varianzanalyse der Verformungseigenschaften der Asphalte im einaxialen Druckschwellversuch; Faktor: Gesteinsart**

Eigenschaft	Asphaltart	F	Signifikanz
$\varepsilon_{10}$	AB 0/11 S	0,007	0,935
$\varepsilon_4$	SMA 0/11 S	0,598	0,462
$\varepsilon_w^*$	AB 0/11 S	0,237	0,640
	SMA 0/11 S	0,281	0,610

### 7.3 Verdichtungswiderstand der Asphalte

Die Verdichtungswiderstände (D-Werte) der Asphalte sind für die untersuchten Bindemittelgehalte in den **Tabellen 7-9** und **7-10** angegeben und in den **Abbildungen 7-7** und **7-8** (für optimale Bindemittelgehalte) graphisch dargestellt. Die Werte für die Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt sind fett gedruckt.

**Tabelle 7-9: D-Wert der Asphaltbetone mit den Grauwacke- bzw. Basaltbrechsanden**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	D-Wert [21 Nm]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
5,6	<b>20,0</b>	<b>19,9</b>	<b>20,9</b>	<b>21,8</b>	<b>25,4</b>	19,2	20,0	20,4	20,6	21,2
5,9	20,0	19,1	20,5	21,4	22,7	<b>19,0</b>	<b>21,7</b>	<b>18,2</b>	<b>19,2</b>	<b>20,5</b>
6,5	18,3	18,5	18,1	18,0	20,8	18,0	17,9	17,8	17,9	19,5

**Tabelle 7-10: D-Wert der Splittmastixasphalte mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	D-Wert [21 Nm]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
6,5						18,6	18,7	19,2	19,8	21,0
6,1	19,1	18,4	19,6	19,4	21,8					



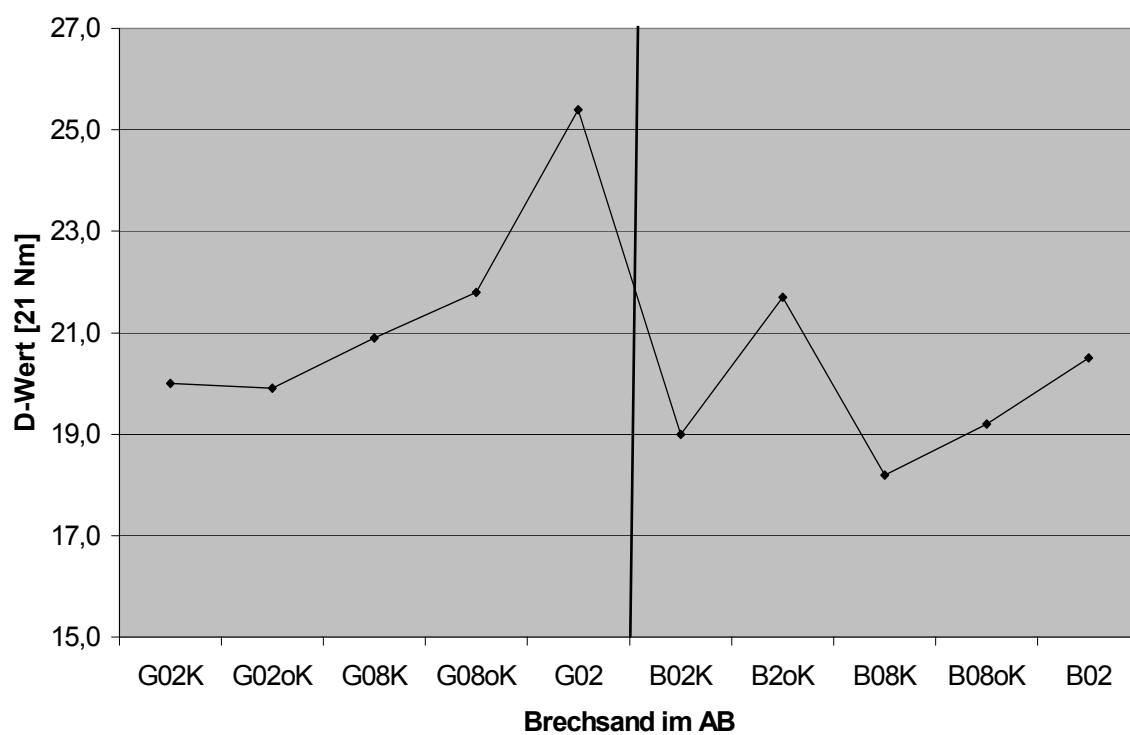


Abbildung 7-7: D-Werte der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt

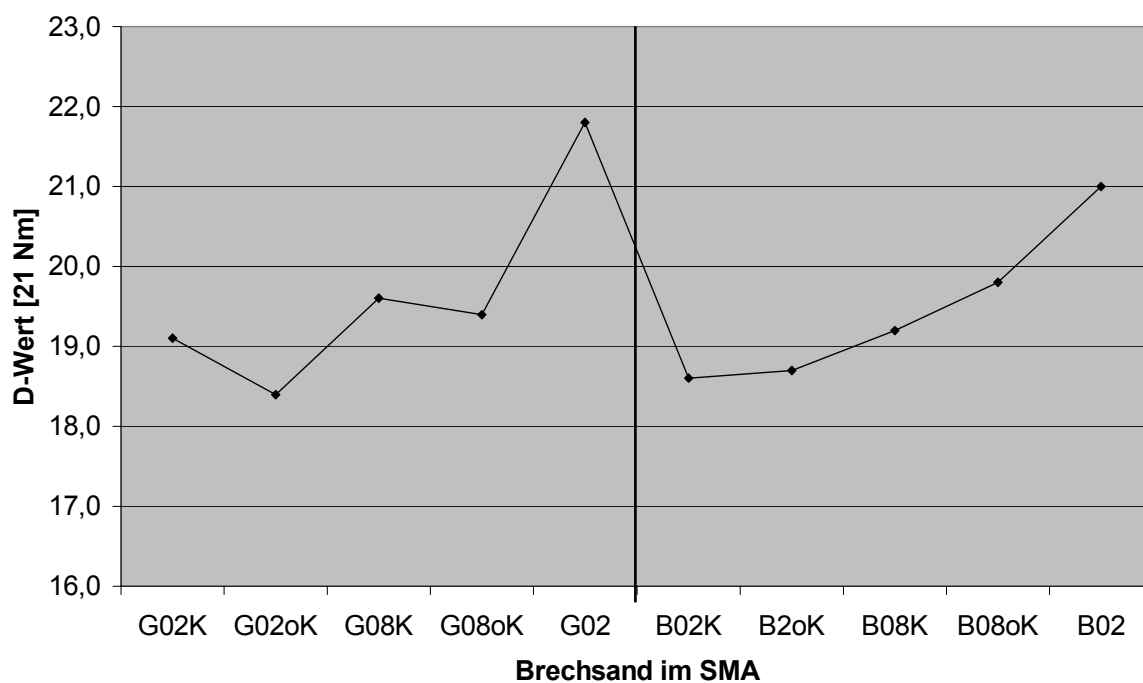


Abbildung 7-8: D-Werte der Splittmastixasphalte mit optimalem Bindemittelgehalt

Um den Einfluss des verwendeten Brechsandes auf den Verdichtungswiderstand der untersuchten Asphalte numerisch ausdrücken zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit der Gesteinsart des Brechsandes als Faktor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-11** aufgeführt.

**Tabelle 7-11: Einfaktorielle Varianzanalyse der D-Werte der Asphalte**

Eigenschaft	Asphaltart	F	Signifikanz
D-Wert	AB 0/11 S	2,52	1,151
	SMA 0/11 S	0,077	0,789

#### 7.4 Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphaltbetone

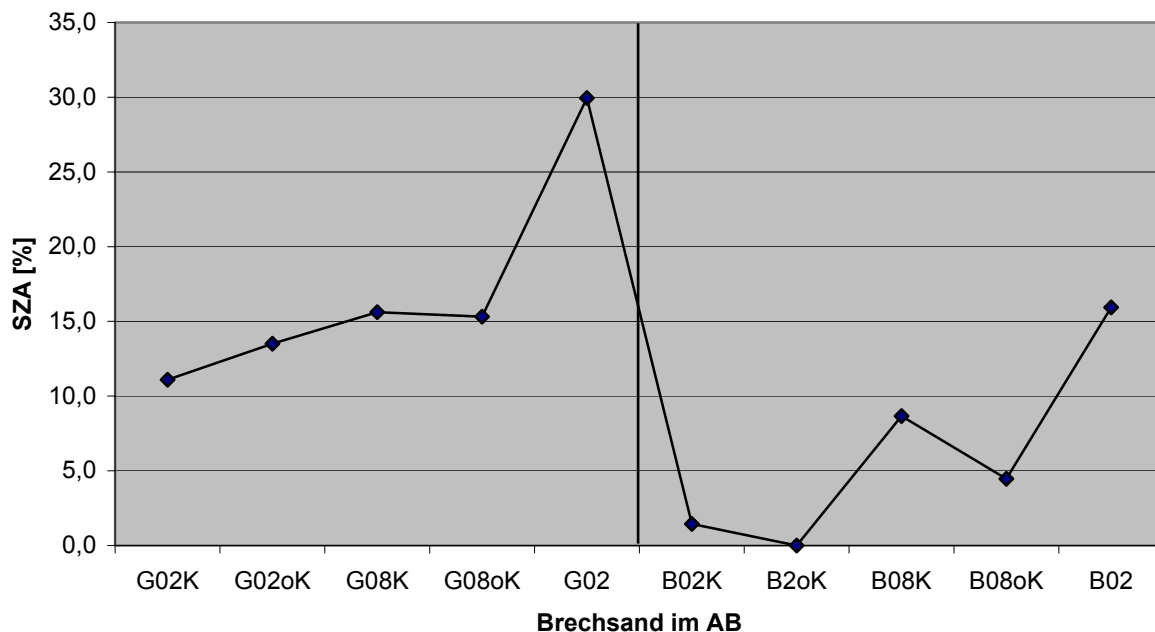
Der prozentuale Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung der Asphalte (SZA) mit optimalem Bindemittelgehalt ist in den **Tabellen 7-12** und **7-13** angegeben und in den **Abbildungen 7-9** und **7-10** graphisch dargestellt.

**Tabelle 7-12: Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphaltbetone bei optimalem Bindemittelgehalt mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden**

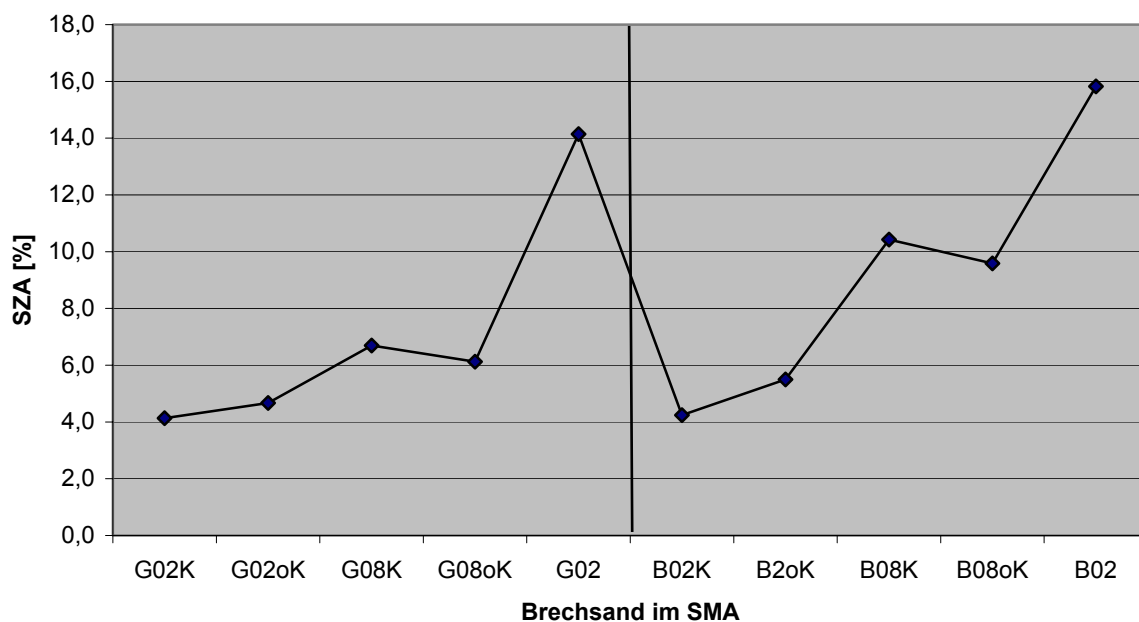
Bindemittel- gehalt [M.-%]	Spaltzugfestigkeitsabfall [%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
5,6	11,1	13,5	15,6	15,3	29,9					
5,9						1,4	0,0	8,7	4,5	15,9

**Tabelle 7-13: Spaltzugfestigkeitsabfall der Splittmastixasphalte bei optimalem Bindemittelgehalt mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden**

Bindemittel- gehalt [M.-%]	Spaltzugfestigkeitsabfall [%]									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
6,1	4,1	4,7	6,7	6,1	14,1					
6,5						4,2	5,5	10,4	9,6	15,8



**Abbildung 7-9: Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt**



**Abbildung 7-10: Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Splittmastixasphalte mit optimalem Bindemittelgehalt**

Um den Einfluss der verwendeten Brechsande auf den SZA der untersuchten Asphaltte numerisch ausdrücken zu können, wurde eine einfaktorische Varianzanalyse mit der Mineralstoffart des Brechsandes als Faktor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-14** aufgeführt.

Tabelle 7-14: Einfaktorielle Varianzanalyse des SZA der Asphalte

Eigenschaft	Asphaltart	F	Signifikanz
Spaltzugfestigkeitsabfall SZA	AB 0/11 S	6,291	0,036
	SMA 0/11 S	0,517	0,493

### 7.5 Stabilität und Fließwert der Asphaltbetone

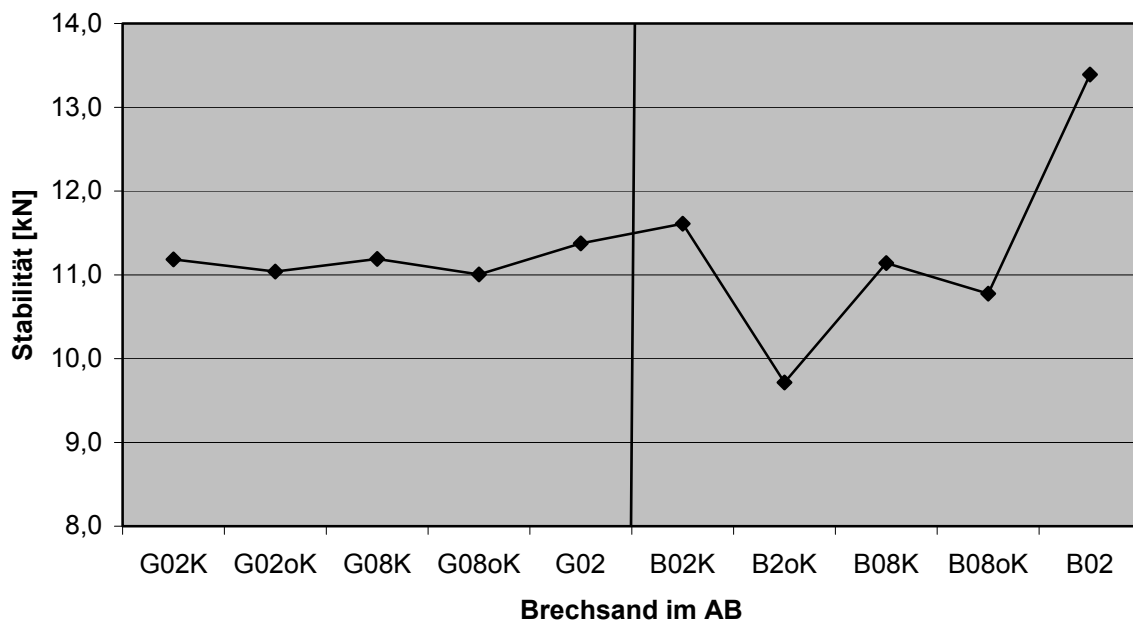
Die Stabilitäten und Fließwerte der Asphaltbetone sind in den **Tabellen 7-15** und **7-16** angegeben. Die Ergebnisse für die Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt sind fett gedruckt. Diese sind in den **Abbildungen 7-11** und **7-12** graphisch dargestellt.

Tabelle 7-15: Stabilitäten der Asphaltbetone mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden

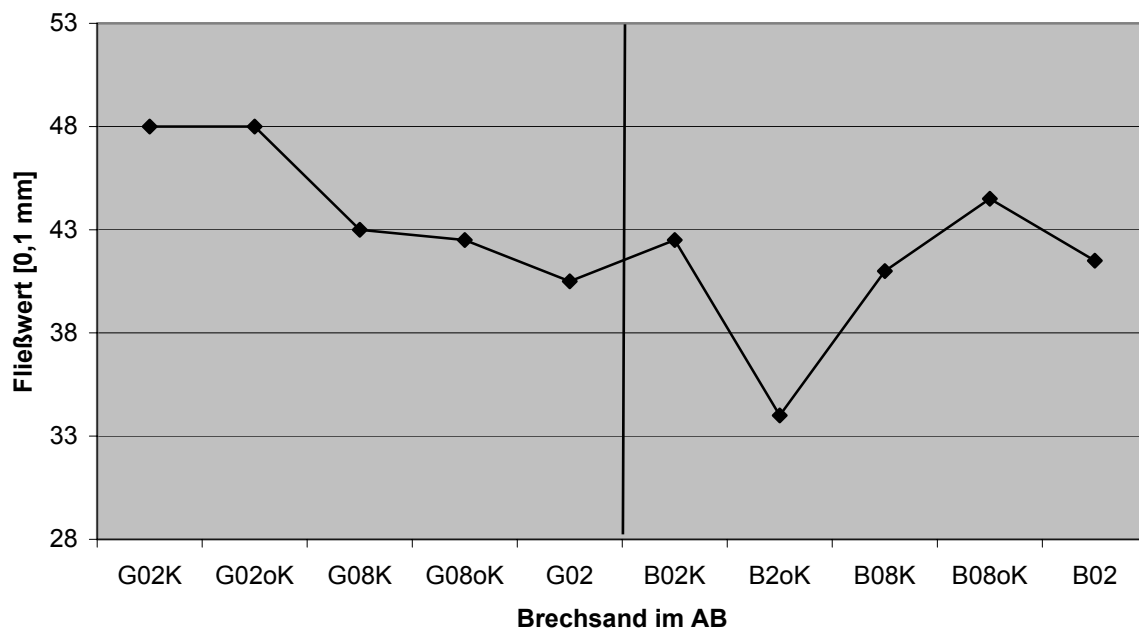
Bindemittel- gehalt [M.-%]	Stabilität [kN] der Asphaltbetone									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
5,6	11,2	11,0	11,2	11,0	11,4	9,8	9,2	11,4	11,5	12,4
5,9	11,6	11,6	12,4	11,5	12,2	11,6	9,7	11,1	10,8	13,4
6,5	10,3	9,6	10,3	10,0	10,4	10,2	11,5	11,1	10,2	11,8

Tabelle 7-16: Fließwerte der Asphaltbetone mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden

Bindemittel- gehalt [M.-%]	Fließwert [0,1 mm] der Asphaltbetone									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
5,6	48,0	48,0	43,0	42,5	40,5	39,0	40,0	42,5	43,5	40,0
5,9	46,5	52,0	59,0	50,5	50,0	42,5	34,0	41,0	44,5	41,5
6,5	54,5	56,0	58,5	52,0	59,0	47,0	51,5	58,5	55,0	51,0



**Abbildung 7-11: Stabilitäten der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt**



**Abbildung 7-12: Fließwerte der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt**

Um den Einfluss des verwendeten Brechsandes auf die Stabilität und den Fließwert der untersuchten Asphaltbetone numerisch ausdrücken zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit der Mineralstoffart des Brechsandes als Faktor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-17** aufgeführt.

**Tabelle 7-17: Einfaktorielle Varianzanalyse der Stabilitäten und Fließwerte der Asphaltbetone**

<b>Eigenschaft</b>	<b>Asphaltart</b>	<b>F</b>	<b>Signifikanz</b>
<b>Stabilität</b>	<b>AB 0/11 S</b>	0,076	0,79
<b>Fließwert</b>		2,489	0,153

## 8 Ergebnisse der Betonuntersuchungen

### 8.1 Frischbetoneigenschaften

Die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen sind in **Tabelle 8-1** für B25 und in **Tabelle 8-2** für B55 enthalten. Die Referenzmischung erreichte ohne Fließmittel nur die Konsistenzklasse KS, so dass bereits bei diesem Beton 0,45 % des Fließmittels Muraplast FF zugegeben wurde. Damit wurde ein Ausbreitmaß von nur 39 cm erreicht, dies entspricht der Konsistenzklasse KP (plastisch). Da nahezu alle anderen Betone steifer waren, war die Messung des Ausbreitmaßes nicht zielführend, und es wurde bei allen Betonen anstelle des Ausbreitmaßes das Verdichtungsmaß bestimmt.

**Tabelle 8-1: Frischbetoneigenschaften der Betone B25**

Verwendeter Sand	Verdichtungsmaß	Konsistenz*	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	LP-Gehalt %	Temperatur °C
Natursand	1,09	KP/C2	2550	0,5	23,7
<b>K02K</b>	1,38	KS/C1	2590	1,4	31,1
<b>K02oK</b>	1,12	KP/C2	2550	0,8	26,8
<b>K08K</b>	1,18	KP/C2	2470	0,6	28,1
<b>K08K**</b>	1,33	KS/C1	2530	1,7	25,5
<b>K08oK</b>	1,14	KP/C2	2550	0,45	26,3
<b>K02</b>	1,20	KS/C2	2540	1,1	25,3
<b>B02K</b>	1,18	KP/C2	2630	0,45	28,0
<b>B02oK</b>	1,21	KS/C2	2600	0,9	23,7
<b>B02oK**</b>	1,24	KS/C2	2600	1,3	26,1
<b>B08K</b>	1,25	KS/C2	2620	1,3	25,6
<b>B08oK</b>	1,12	KP/C2	2620	0,8	25,6
<b>B02</b>	1,21	KS/C2	2620	1,0	26,2

\* Angabe der Konsistenzklasse nach DIN 1045:1988/DIN 1045-2:2001

\*\* zusätzliche Versuche mit Verwendung des Brechsands im Originalzustand, d.h. mit vollem Anteil an Mehlkorn (s. Tabelle 3-12)

**Tabelle 8-2: Frischbetoneigenschaften der Betone B55**

Verwendeter Sand	Verdichtungsmaß	Konsistenz*	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	LP-Gehalt %	Temperatur °C
Natursand	1,23	KS/C2	2600	1,4	23,6
<b>K02oK</b>	1,11	KP/C2	2540	0,8	25,7
<b>B02</b>	1,21	KS/C2	2620	1,0	26,2
<b>B02oK</b>	1,21	KS/C2	2600	0,9	23,7

\* Angabe der Konsistenzklasse nach DIN 1045:1988/DIN 1045-2:2001

## 8.2 Festbetoneigenschaften

Die Eigenschaften der Festbetone sind in **Tabelle 8-3** für die Betone B25 und in **Tabelle 8-4** für die Betone B55 zusammengestellt. Die angestrebte Betonfestigkeitsklasse B25 -in der Eignungsprüfung werden  $\geq 35$  MPa gefordert- wird von allen Betonen sicher erreicht. Aufgrund des relativ hohen Zementgehalts, der aus Verarbeitungsgründen gewählt werden musste, war dies auch zu erwarten. Tendenziell sind die Festigkeiten der Betone mit Brechsand gegenüber denen mit Natursand etwas höher.

**Tabelle 8-3: Festbetoneigenschaften der Betone B25**

Verwendeter Sand	Druckfestigkeit			Spaltzugfestigkeit		Dyn. E-Modul			Carbonatisierungstiefe		Wassereindringung
	MPa			MPa		MPa			mm		mm
	2 d	7 d	28 d	28 d	90 d	7 d*	14 d	28 d	28 d	90 d	28 d
Natursand	13	32	46	4,4	4,3	38380	39330	41070	0,1	0,3	16
K02K	15	32	47	4,7	4,7	44570	42520	45410	1,0	2,2	26
K02oK	20	36	50	5,2	4,7	44840	45093	45410	1,6	3,5	21
K08K	18	35	49	4,0	4,4	47310	47730	49090	0,1	2,2	10
<i>K08K***</i>	18	35	51	3,8	3,9	44950	42000	44960	1,0	2,3	18
K08oK	14	31	47	3,6	4,1	41940	42980	45290	0,3	3,3	26
K02	13	31	49	4,2	4,3	45780	45840	41070	1,0	3,1	31
B02K	13	27	44	3,5	4,2	38850	39700	39700	1,0	3,4	23
B02oK	15	29	48	4,8	5,1	38790	38340	40500	0,1	2,7	99
<i>B02oK***</i>	14	27	45	4,8	4,9	42080	42122	42820	0,9	2,0	22
B08K	12	23	43	3,6	3,7	37120	42080	41100	2,1	3,1	12
B08oK	20**	32	49	3,9	4,7	41610	41920	44220	1,0	2,6	19
B02	16	28	45	4,1	4,4	36700	39222	40760	0,1	2,5	7

\* geprüft nach Wasserlagerung

\*\* geprüft nach drei Tagen

\*\*\* zusätzliche Versuche mit Verwendung des Brechsands im Originalzustand, d.h. mit vollem Anteil an Mehlkorn (s. Tabelle 3-12)



Die erforderliche Druckfestigkeit für eine Eignungsprüfung (60 MPa + Vorhaltemaß) wurde beim B55 nicht ganz erreicht, das beeinträchtigt aber nicht die Aussagekraft der Ergebnisse. Entscheidend dafür sind die Vergleiche zwischen den Betonen mit Brechsanden aus der Vertikalprallbrecher-Herstellung und den Betonen mit Natursand bzw. mit dem Brechsand herkömmlicher Herstellung.

**Tabelle 8-4: Festbetoneigenschaften der Betone B55**

Verwendeter Sand	Druckfestigkeit			Spaltzugfestigkeit		Dyn. E-Modul			Carbonatisierungstiefe		Wassereindringung
	MPa			MPa		MPa			mm		mm
	2 d	7 d	28 d	28 d	90 d	7 d*	14 d	28 d	28 d	90 d	28 d
<b>Natursand</b>	30	45	63	4,8	5,0	49620	51320	51270	0	0	14
<b>K02oK</b>	32	47	63	6,1	5,2	44130	46190	47250	0,3	1,8	13
<b>B02</b>	32	41	63	5,6	5,3	41880	45950	46500	0	0,8	18
<b>B02oK</b>	28	42	62	6,7	5,4	42330	45244	46720	0	1,0	24

\* geprüft nach Wasserlagerung

## 9 Funktionaler Zusammenhang zwischen Brechsand- und Asphalteigenschaften

Im Folgenden werden nur die statistisch ermittelten Eigenschaften derjenigen Variablen angegeben, die in der multiplen linearen Regression eine maximale Funktionalität mit der jeweiligen Eigenschaft des Asphalttes ergaben.

Um die funktionalen Zusammenhänge zu verdeutlichen, sind die in den Tabellen erläuterten Variablen zusätzlich graphisch dargestellt. Die Abkürzungen AV und UV bedeuten abhängige bzw. unabhängige Variable. Auf die graphische Darstellung und die Angabe des Konfidenzintervalls der Regressionsvariablen „Gestein“ wird verzichtet.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der multiplen linearen Regression ist **Anhang 5** zu entnehmen.

### 9.1 Fiktiver Hohlraumgehalt

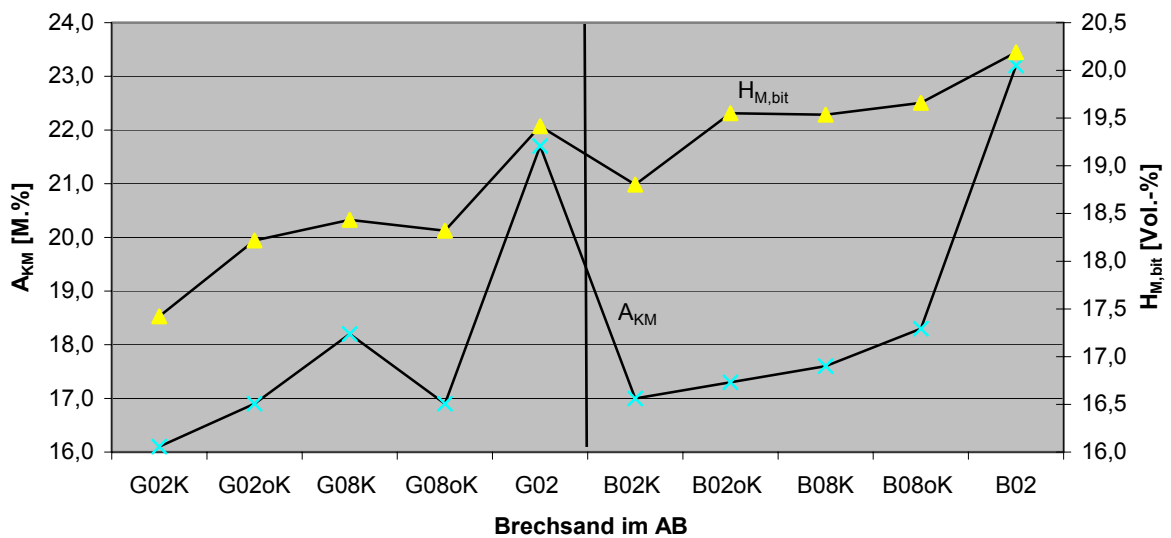
In den **Tabellen 9-1** und **9-2** ist der Einfluss der Brechsandeigenschaften auf den fiktiven Hohlraumgehalt der Asphalte anhand der Ergebnisse der multiplen linearen Regression angegeben. Die relevanten Variablen sind in den **Abbildungen 9-1** bis **9-6** graphisch dargestellt.

**Tabelle 9-1: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem fiktiven Hohlraumgehalt der Asphaltbetone**

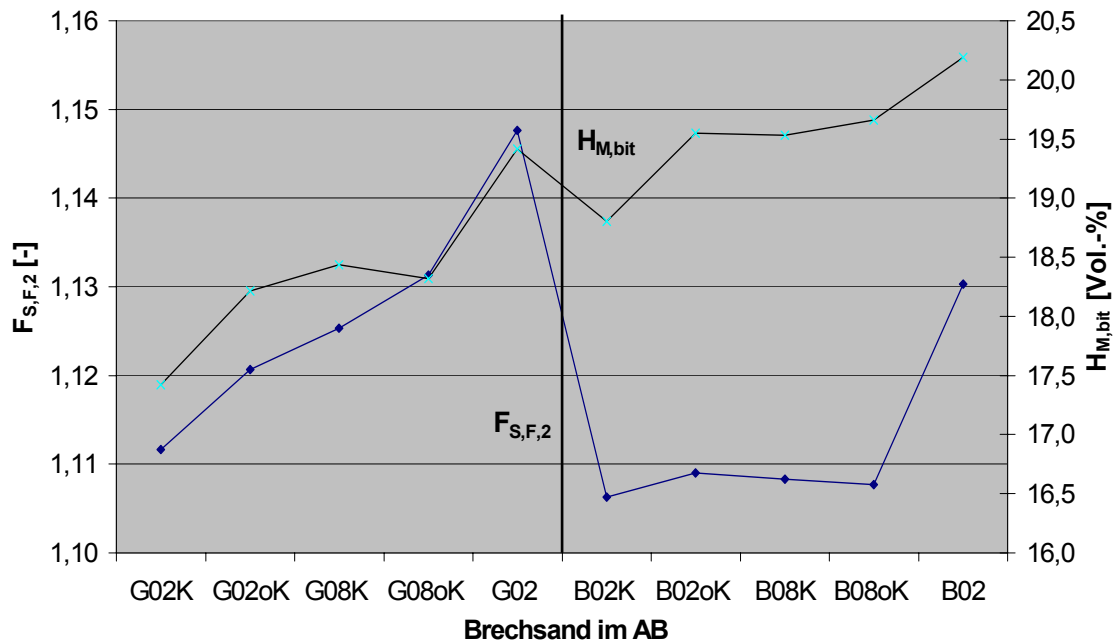
Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechsandeigenschaft; AV: <math>H_{M,bit}</math></b>									
r		0,934		$< 1 ‰$					
UV	<b>A<sub>KM</sub></b>		0,585	0,004	0,972	3,363			
UV	<b>Gestein</b>		0,638	0,002					
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: <math>H_{M,bit}</math></b>									
r		0,956		$< 1 ‰$					
UV	<b>F<sub>S,F,2</sub></b>		0,726	0,004	25,87	64,36	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1, G</sub>	0,63
UV	<b>Gestein</b>		1,126	$< 1 ‰$			F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2, G</sub>	0,34
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: <math>H_{M,bit}</math></b>									
r		0,939		0,001					
UV	<b>F<sub>S,Ä,1</sub></b>		0,590	0,003	10,9	35,1	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kub,Ä,1, G</sub>	0,58
UV	<b>Gestein</b>		0,814	0,001			F <sub>Kub,Ä,1,M</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,17

**Tabelle 9-2: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem fiktiven Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte**

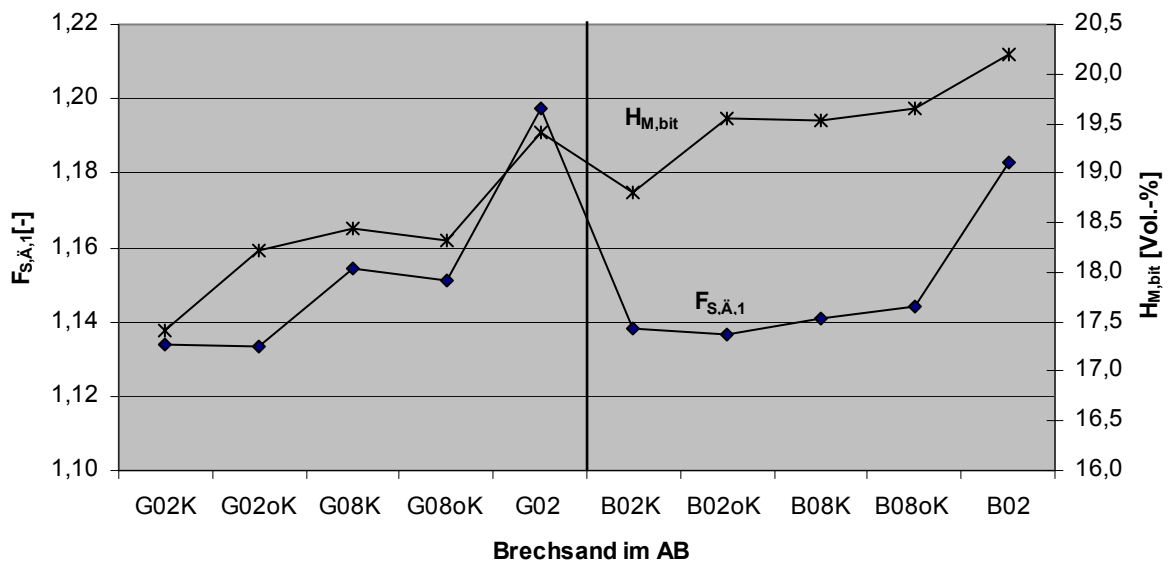
Parameter	Bezeichnung	Wert	b <sub>s</sub>	Sig.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechsandeigenschaft; AV: H<sub>M,bit</sub></b>									
r		0,920		0,001					
UV	A <sub>KM</sub>		0,405	0,03	0,118	1,765			
UV	Gestein		0,762	0,001					
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; δ=d<sub>F</sub>; AV: H<sub>M,bit</sub></b>									
r		0,954		< 1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>					
UV	F <sub>S,F,2</sub>		0,561	0,004	9,531	34,204	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub> , G	0,71
UV	Gestein		1,131	< 1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>			F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub> , G	0,23
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; δ=d<sub>Ä</sub>; AV: H<sub>M,bit</sub></b>									
r		0,991		< 1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>					
UV	F <sub>Kub,Ä,2</sub>		-0,772	0,001	-18,5	-7,9	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kub,Ä,2</sub> F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,48
UV	F <sub>Kon,Ä,1</sub>		1,098	< 1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	4,3	7,4	F <sub>Kub,Ä,2</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,43
UV	Gestein		0,745	< 1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>			F <sub>Kon,Ä,1</sub>		



**Abbildung 9-1: Fiktiver Hohlraumgehalt der Asphaltbetone und ihn beeinflussende Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle**



**Abbildung 9-2:** Fiktiver Hohlraumgehalt der Asphaltbetone und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )



**Abbildung 9-3:** Fiktiver Hohlraumgehalt der Asphaltbetone und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ )

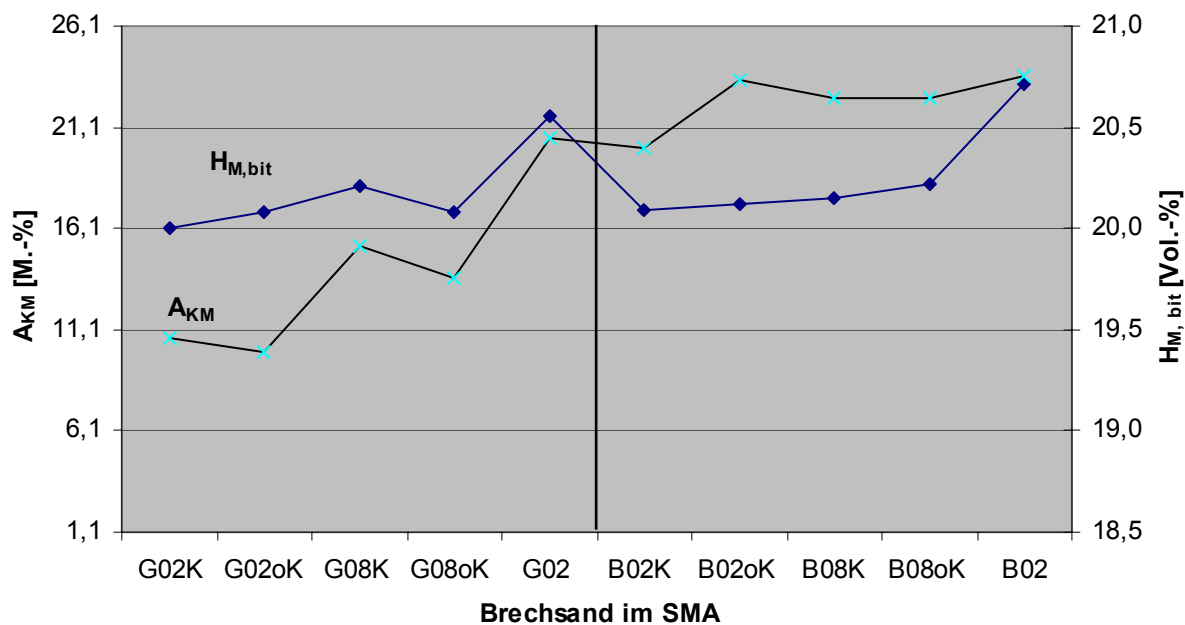


Abbildung 9-4: Fiktiver Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte und ihn beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle

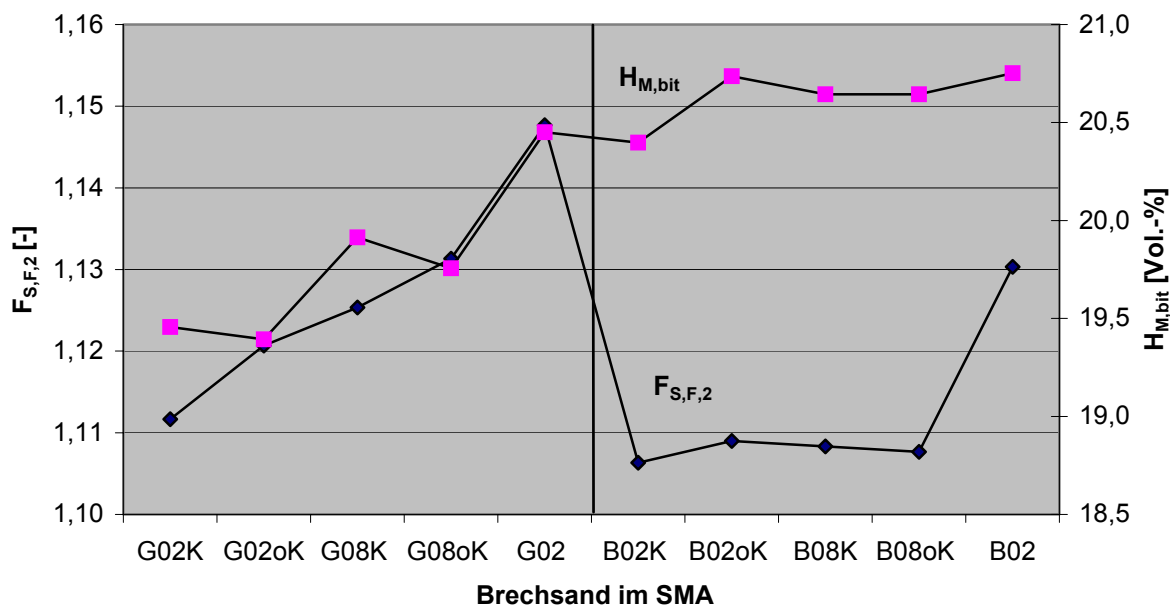
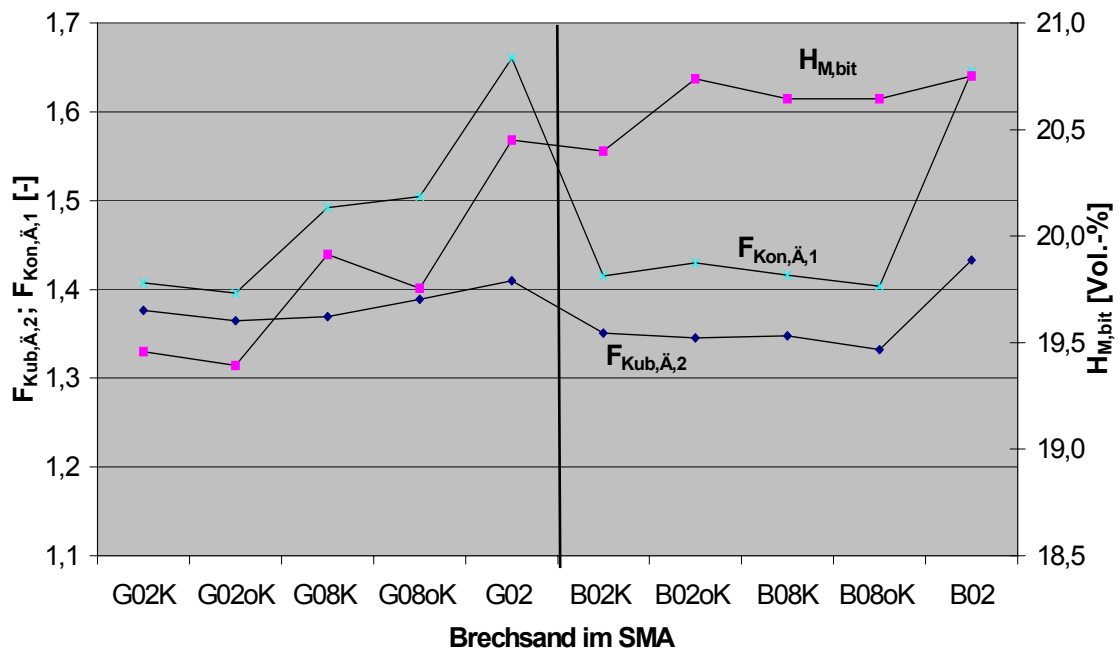


Abbildung 9-5: Fiktiver Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )



**Abbildung 9-6: Fiktiver Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_{\Delta}$ )**

## 9.2 Verformungswiderstand

### 9.2.1 Dehnung nach 10 kLW bzw. 4 kLW

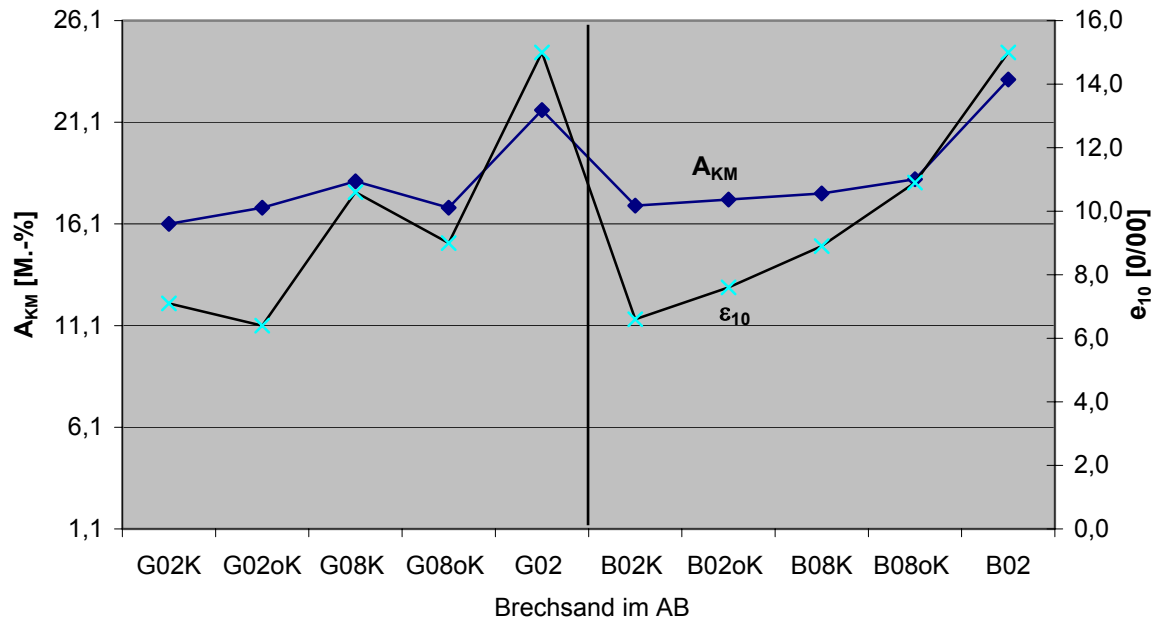
In den **Tabellen 9-3** und **9-4** ist der Einfluss der Brechsandeigenschaften auf  $\varepsilon_{10}$  (der Asphaltbetone) und  $\varepsilon_4$  (der Splittmastixasphalte) anhand der Ergebnisse der multiplen linearen Regression angegeben. Unter den verwendeten Kriterien des verwendeten Regressionsalgorithmus konnte zwischen den mechanischen Brechsandeigenschaften und  $\varepsilon_4$  kein linearer Zusammenhang berechnet werden. Die relevanten Variablen sind in den **Abbildungen 9-7** bis **9-11** graphisch dargestellt.

**Tabelle 9-3: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und der Dehnung des Asphaltbetons nach 10 kLW ( $\varepsilon_{10}$ )**

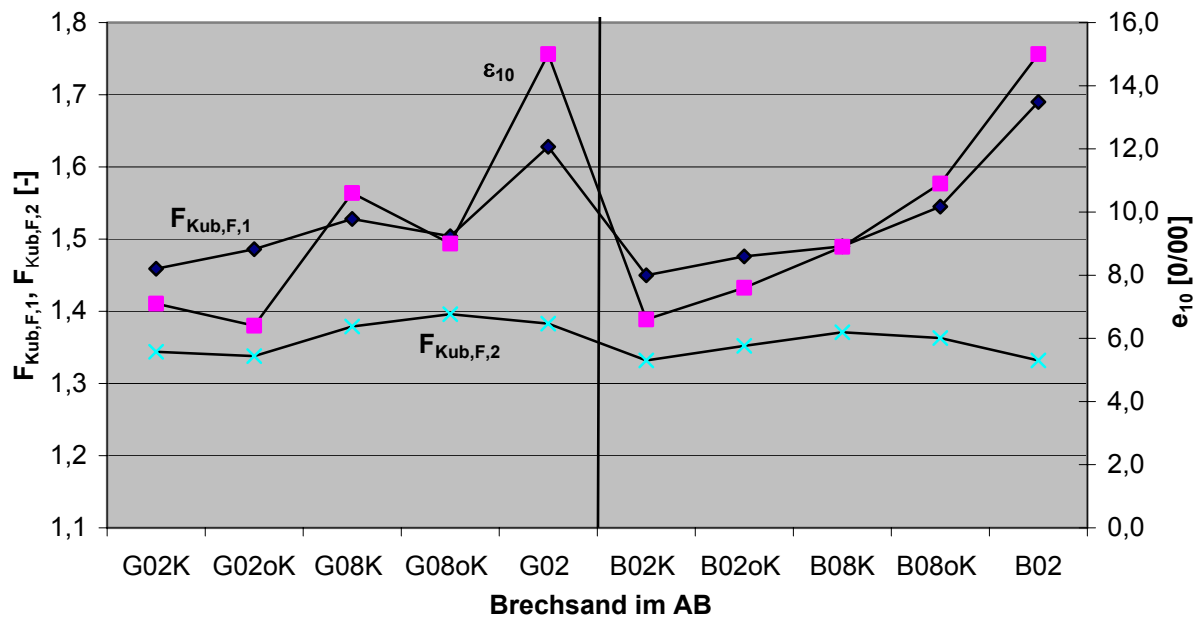
Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Sig.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechsandeigenschaft; AV: <math>\varepsilon_{10}</math></b>									
r		0,940		< 1 ‰					
UV	A <sub>KM</sub>		0,940	< 1 ‰	9,2	16,9			
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: <math>\varepsilon_{10}</math></b>									
r		0,976		< 1 ‰					
UV	F <sub>Kub,F,1</sub>		0,948	< 1 ‰	31,2	47,2	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,91
UV	F <sub>Kub,F,2</sub>		0,2	0,045	0,8	53,2	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,31
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: <math>\varepsilon_{10}</math></b>									
r		0,992		< 1 ‰					
UV	F <sub>Kon,Ä,2</sub>		1,095	< 1 ‰	47,7	63,5	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,52
UV	F <sub>Kon,Ä,3</sub>		0,215	0,021	-61,2	-7,2	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	0,39
UV	RRSBn <sub>Ä</sub>		-0,158	0,034	-7,6	-4,2			

**Tabelle 9-4: Funktionaler Zusammenhang zwischen den photooptischen Brechsandeigenschaften und der Dehnung des Splittmastixasphaltes nach 4 kLW ( $\varepsilon_4$ )**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Sig.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: <math>\varepsilon_4</math></b>									
r		0,752		0,012			F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,66
UV	F <sub>S,F,2</sub>		0,752	0,012	28,9	173,0	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,09
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: <math>\varepsilon_4</math></b>									
r		0,724		0,018			F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,53
UV	F <sub>S,Ä,1</sub>		0,724	0,018	13,6	108,2	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,35



**Abbildung 9-7:**  $\epsilon_{10}$  und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle



**Abbildung 9-8:**  $\epsilon_{10}$  und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_F$ )



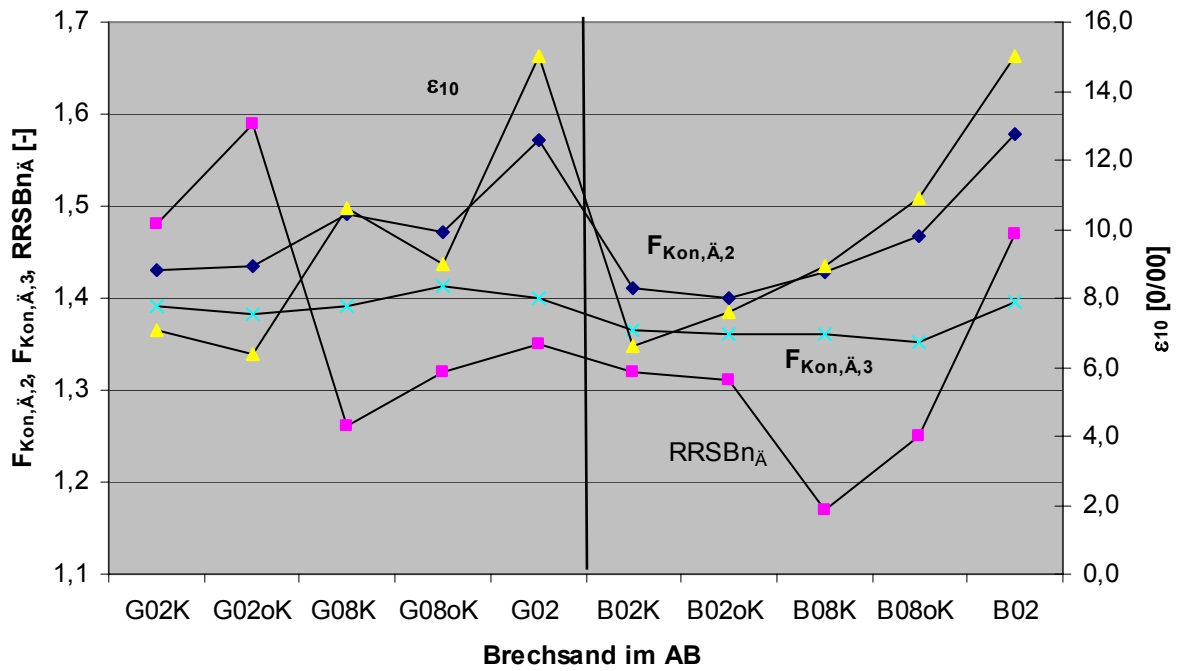


Abbildung 9-9:  $\epsilon_{10}$  und beeinflussende photooptische Brechsand-eigenschaften ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )

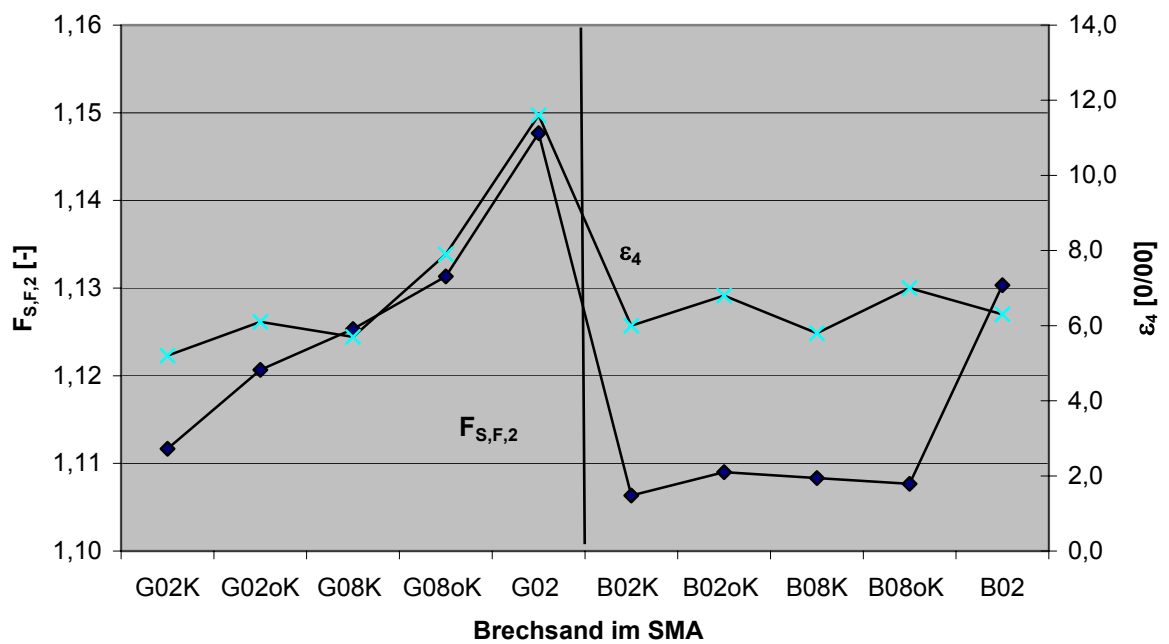


Abbildung 9-10:  $\epsilon_4$  und beeinflussende photooptische Brechsandeigen-schaften ( $\delta = d_F$ )

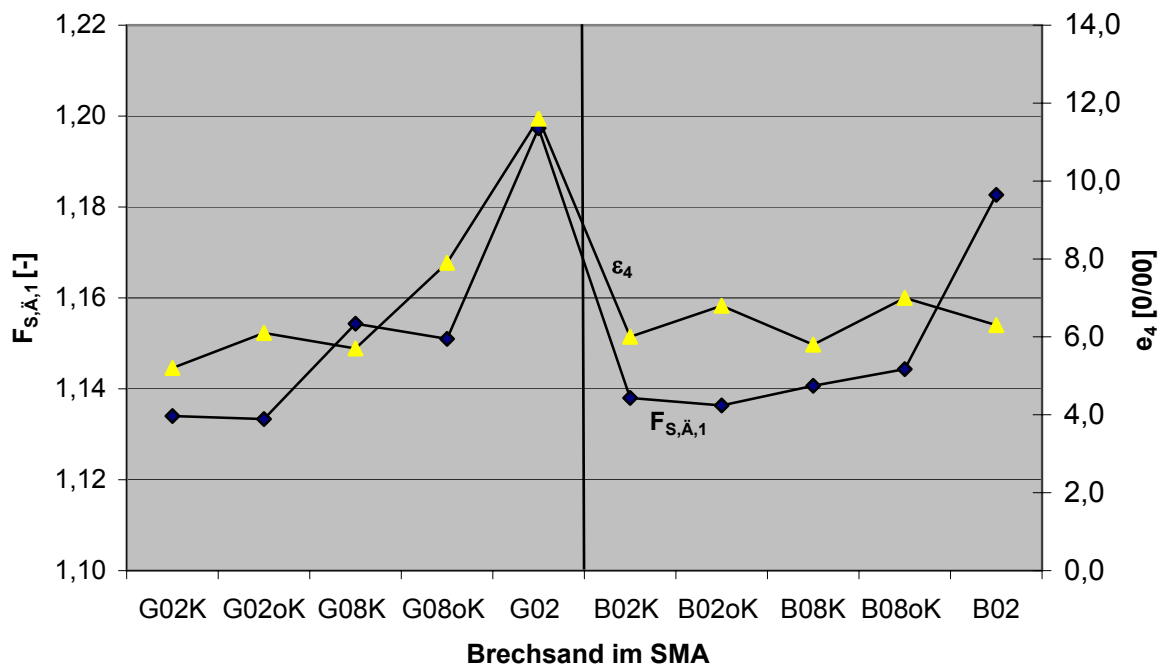


Abbildung 9-11:  $\varepsilon_4$  und beeinflussende photooptische Brechseigenschaften ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )

## 9.2.2 Dehnungsrate der Asphalte

In den **Tabellen 9-5** und **9-6** ist der Einfluss der Brechseigenschaften auf die Dehnungsrate  $\varepsilon_w^*$  anhand der Ergebnisse der multiplen linearen Regression angegeben. Unter den verwendeten Kriterien des verwendeten Regressionsalgorithmus konnte zwischen den mechanischen Brechseigenschaften und  $\varepsilon_w^*$  der Splittmastixasphalte kein linearer Zusammenhang berechnet werden. Die relevanten Variablen sind in den **Abbildungen 9-12** bis **9-16** graphisch dargestellt

**Tabelle 9-5: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechseigenschaften und der Dehnungsrate  $\varepsilon_w^*$  des Asphaltbetons**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechseigenschaft; AV: <math>\varepsilon_w^*</math></b>									
r		0,789		0,007					
UV	$A_{KM}$		0,789	0,007	2,5	11,1			
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: <math>\varepsilon_w^*</math></b>									
r		0,836		0,003			$F_{Kub,F,1}$	$F_{S,F,2}$	0,8
UV	$F_{Kub,F,1}$		0,836	0,003	10,0	32,8	$F_{S,F,2}$	$F_{Kub,F,1}$	0,27
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: <math>\varepsilon_w^*</math></b>									
r		0,914		0,002			$F_{Kon,\ddot{A},2}$	$F_{S,\ddot{A},1}$	0,64
UV	$F_{Kon,\ddot{A},2}$		0,728	0,002	11,4	34,4	$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{Kon,\ddot{A},2}$	0,40
UV	$FG_{\ddot{A}}$		0,468	0,019	0,6	5,1	$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{Kon,\ddot{A},2}$	0,40

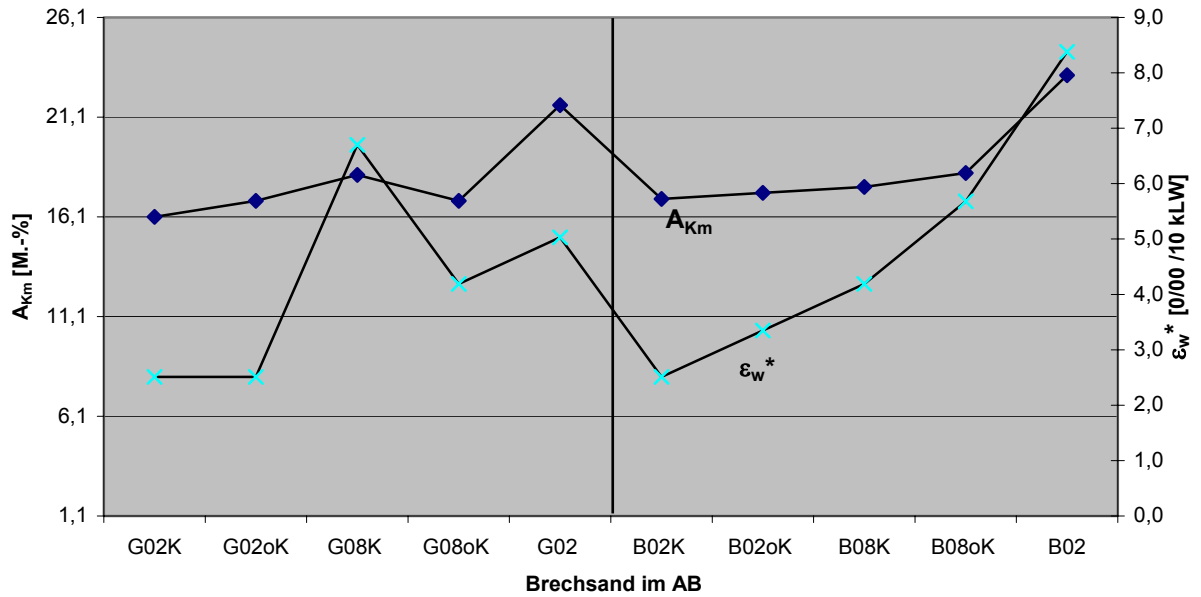


Abbildung 9-12:  $\epsilon_w^*$  der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle

Tabelle 9-6: Funktionaler Zusammenhang zwischen den photooptischen Brechsandeigenschaften und der Dehnungsrate  $\epsilon_w^*$  des Splittmastixasphaltes

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation			
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert	
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: <math>\epsilon_w^*</math></b>										
r		0,702		0,024			$F_{Kub,F,3}$	$F_{S,F,2}$	0,33	
UV	$F_{S,F,2}$		0,702	0,024	3,518	37,0	$F_{S,F,2}$	$F_{Kub,F,3}$	0,07	
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: <math>\epsilon_w^*</math></b>										
r		0,678		0,031			$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{Kon,\ddot{A},1}$	0,41	
UV	$F_{S,\ddot{A},1}$		0,678	0,031	1,4	23,1	$F_{Kon,\ddot{A},1}$	$F_{S,\ddot{A},1}$	0,23	
<b>UV: Mechanische oder photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: <math>\epsilon_w^*</math></b>										
r (kombiniert)		0,881		0,005			$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{Kon,\ddot{A},2}$	0,41	
UV	$F_{S,\ddot{A},1}$		0,678	0,031	1,4	23,1				
UV	FZ	Keine signifikante Korrelation						$F_{Kon,\ddot{A},2}$	$F_{S,\ddot{A},1}$	0,23

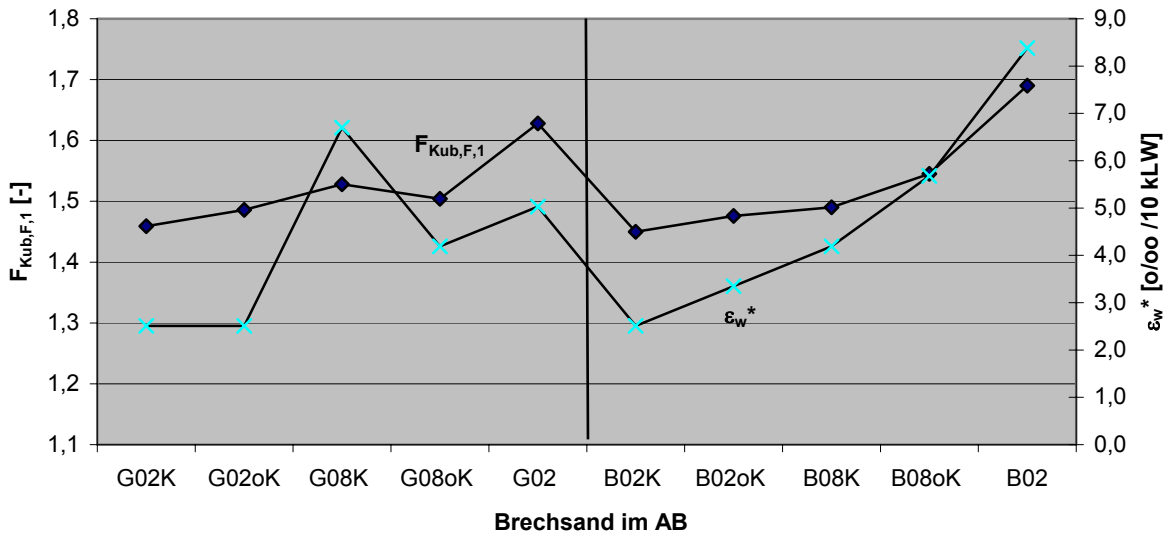


Abbildung 9-13:  $\epsilon_w^*$  der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )

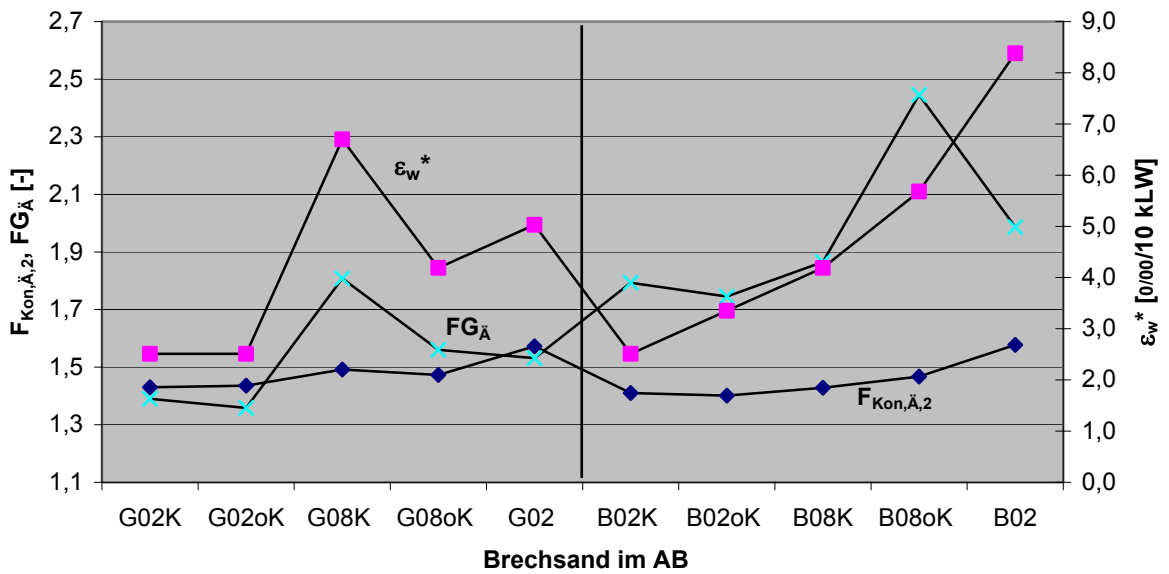


Abbildung 9-14:  $\epsilon_w^*$  der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )

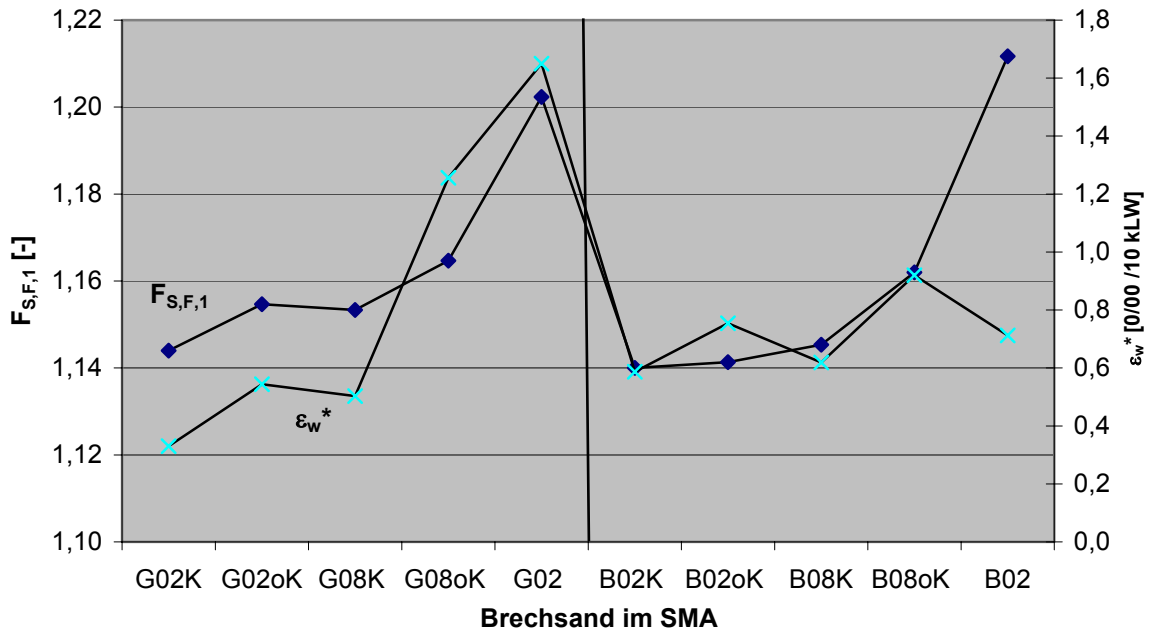


Abbildung 9-15:  $\epsilon_w^*$  der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechseigenschaft ( $\delta = d_F$ )

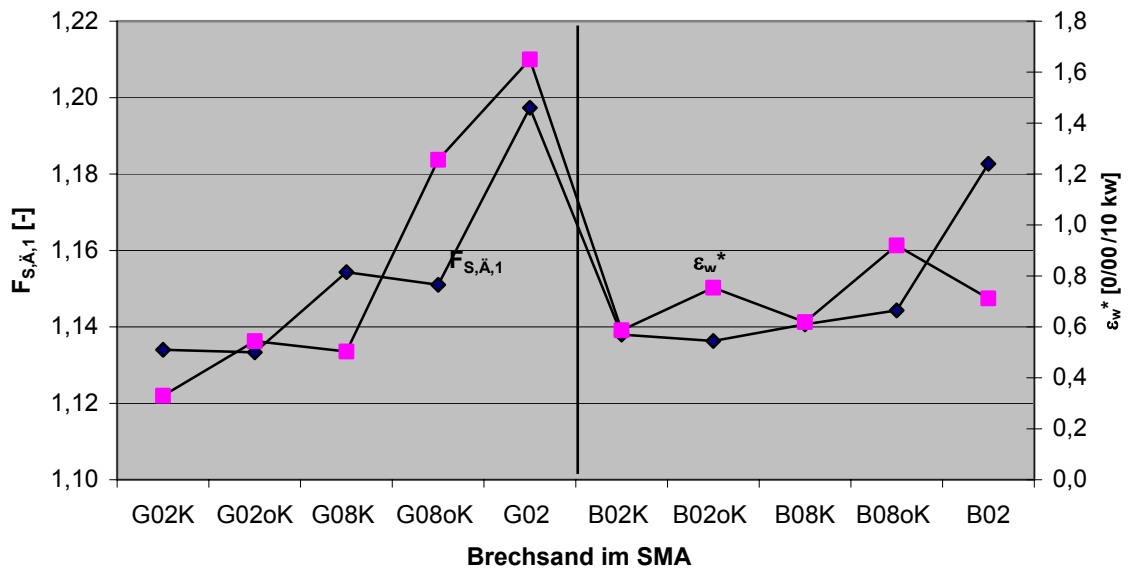


Abbildung 9-16:  $\epsilon_w^*$  der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechseigenschaft ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )

### 9.3 Verdichtungswiderstand der Asphalte

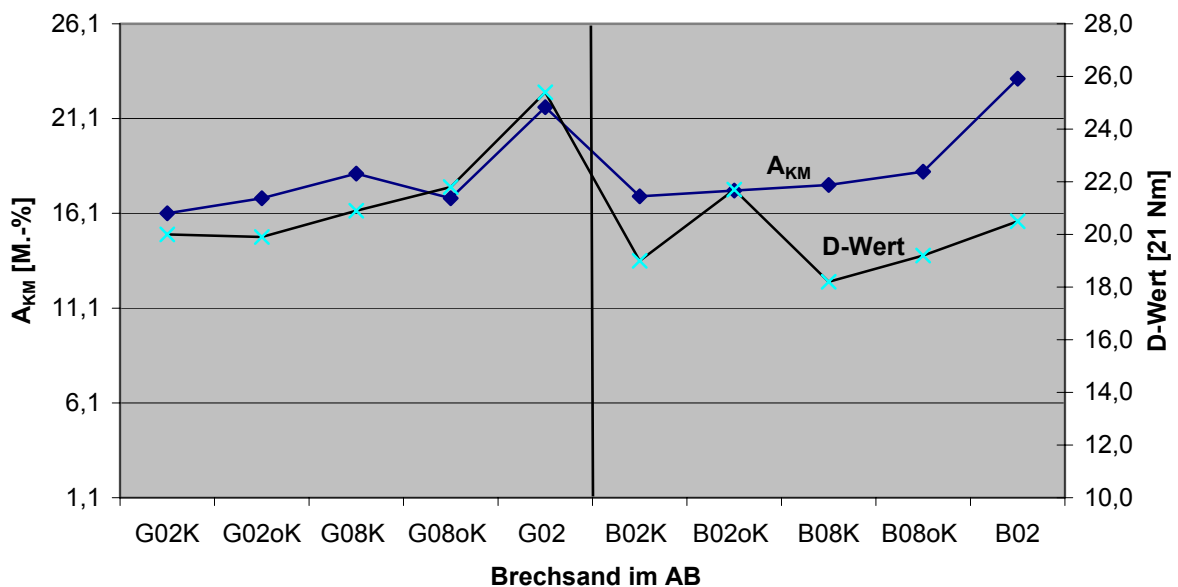
In den **Tabellen 9-7** und **9-8** ist der Einfluss der Brechseigenschaften auf den D-Wert der Asphalte anhand der Ergebnisse der multiplen linearen Regression angegeben. Die relevanten Variablen sind in den **Abbildungen 9-17** bis **9-22** graphisch dargestellt.

**Tabelle 9-7: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechseigenschaften und dem Verdichtungswiderstand (D-Wert) der Asphaltbetone**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechseigenschaft; AV: D-Wert</b>									
<b>r</b>		0,732		0,068					
<b>UV</b>	<b>A<sub>KM</sub></b>		0,551	0,073	-0,6	10,3			
<b>UV</b>	<b>Gestein</b>		0,581	0,062					
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: D-Wert</b>									
<b>r</b>		0,827		0,003			$F_{S,F,2}$	$F_{Kub,F,1}$	0,79
<b>UV</b>	<b>F<sub>S,F,2</sub></b>		0,827	0,003	54,4	189,9	$F_{Kub,F,1}$	$F_{S,F,2}$	0,28
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_A</math>; AV: D-Wert</b>									
<b>r</b>		0,757		0,011			$F_{Kub,\ddot{A},1}$	$F_{S,\ddot{A},1}$	0,38
<b>UV</b>	<b>F<sub>Kub,\ddot{A},1</sub></b>		0,757	0,011	5,0	28,6	$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{Kub,\ddot{A},1}$	0,04

**Tabelle 9-8: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem Verdichtungswiderstand (D-Wert) der Splittmastixasphalte**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechsandeigenschaft; AV: D-Wert</b>									
$r$		0,889		0,001					
<b>UV</b>	<b>A<sub>KM</sub></b>		0,889	0,001	2,4	5,9			
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: D-Wert</b>									
$r$		0,938		<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>			$F_{S,F,1}$	$F_{Kub,F,1}$	0,61
<b>UV</b>	<b>F<sub>S,F,1</sub></b>		0,938	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	27,7	56,6	$F_{Kub,F,1}$	$F_{S,F,1}$	0,09
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_A</math>; AV: D-Wert</b>									
$r$		0,964		<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>			$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{Kon,\ddot{A},1}$	0,85
<b>UV</b>	<b>F<sub>S,\ddot{A},1</sub></b>		0,964	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	37,0	58,4	$F_{Kon,\ddot{A},1}$	$F_{S,\ddot{A},1}$	0,56



**Abbildung 9-17: D-Wert der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle**



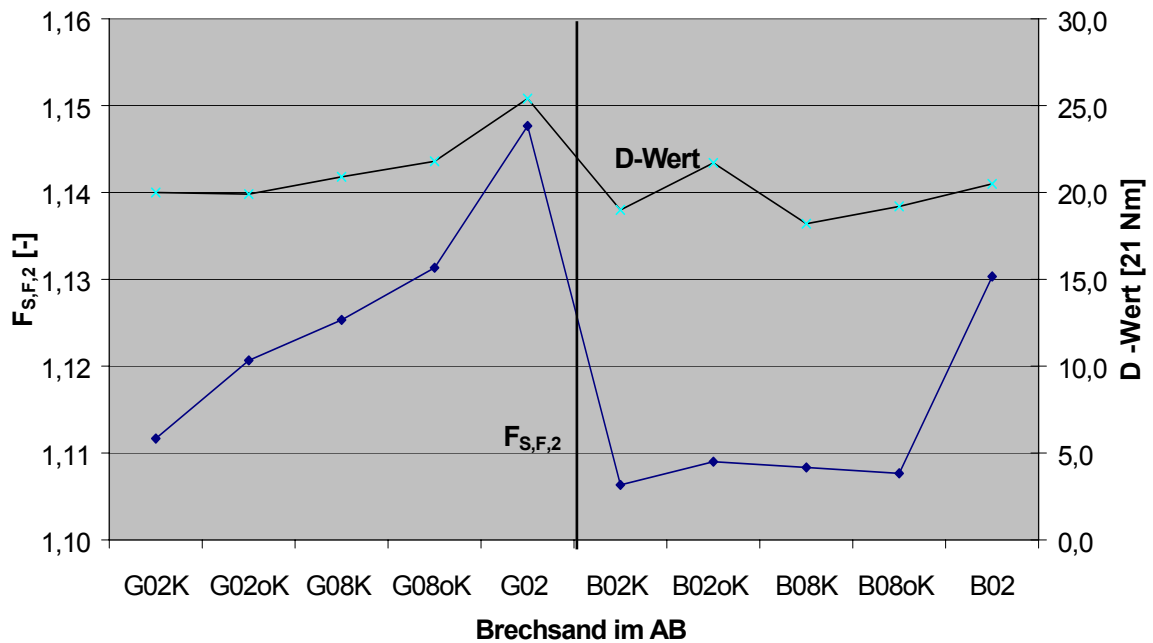


Abbildung 9-18: D-Wert der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )

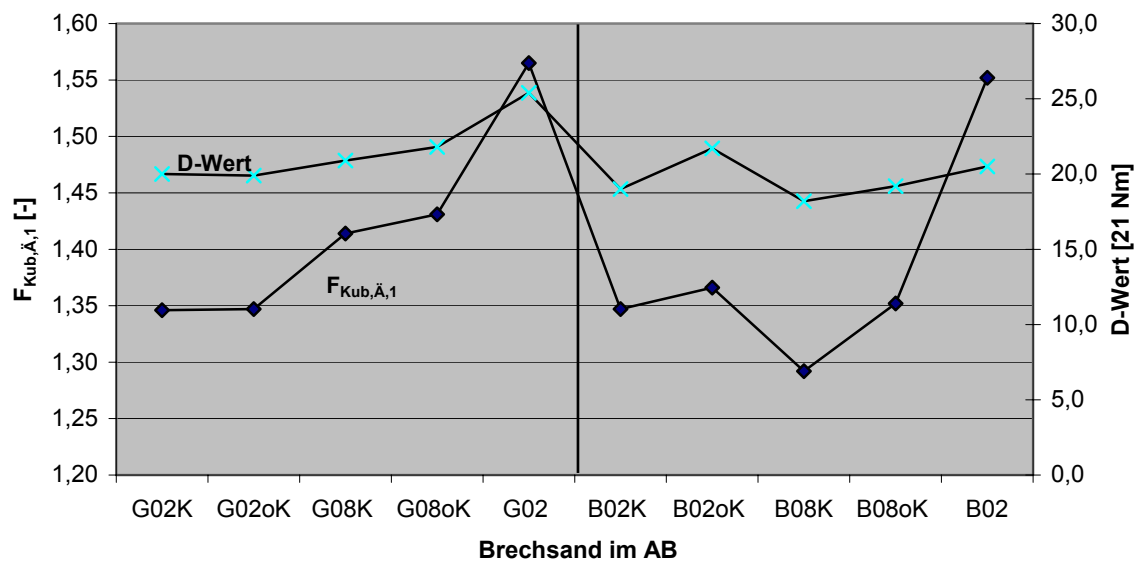
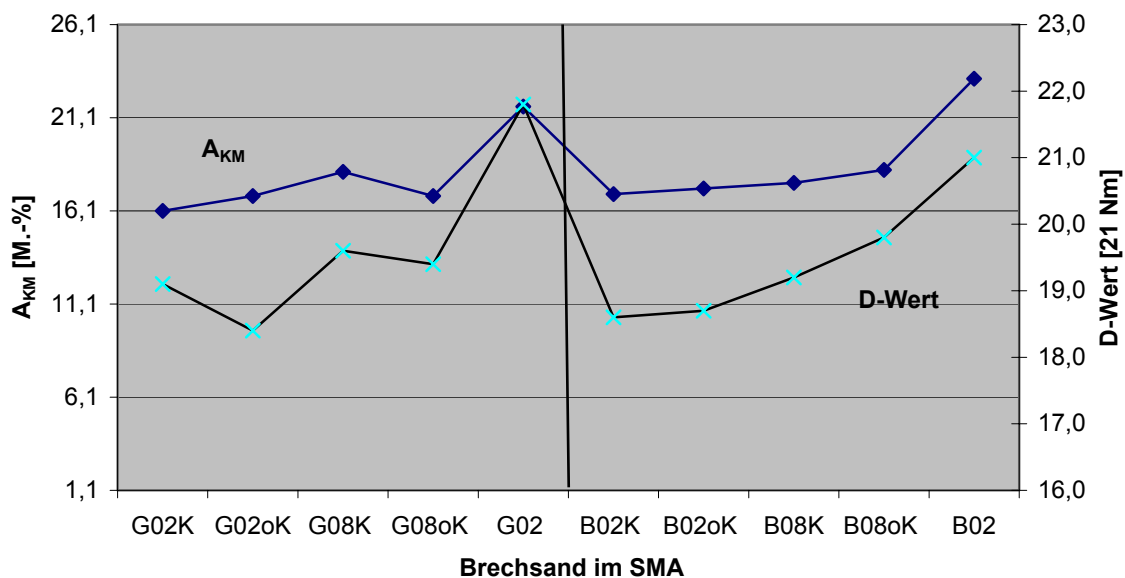
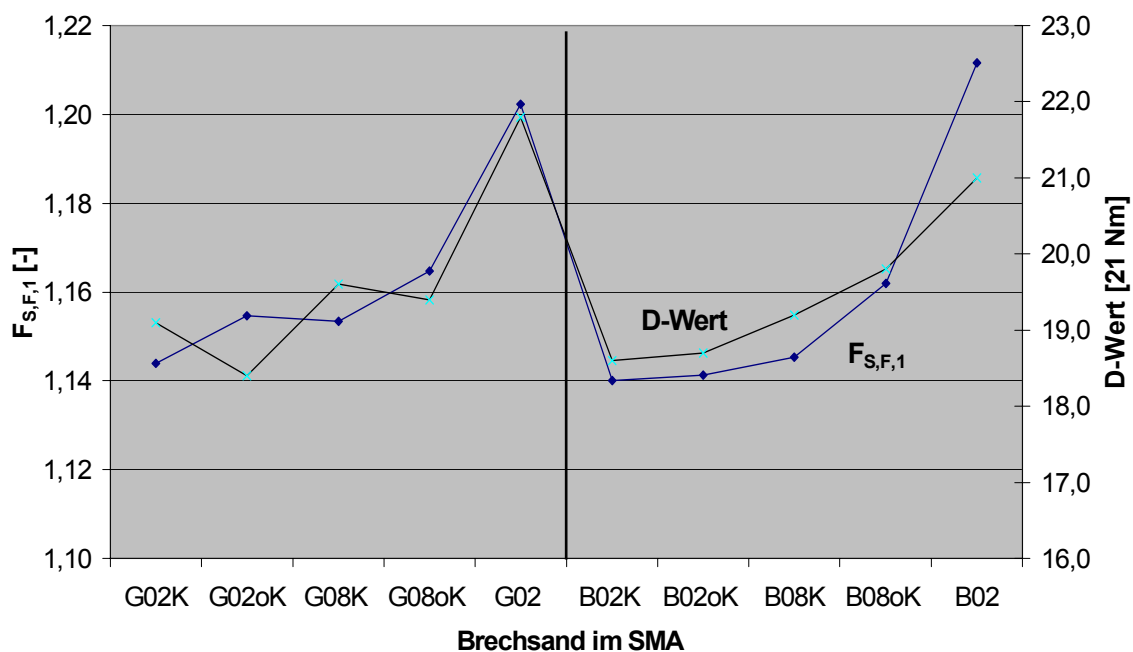


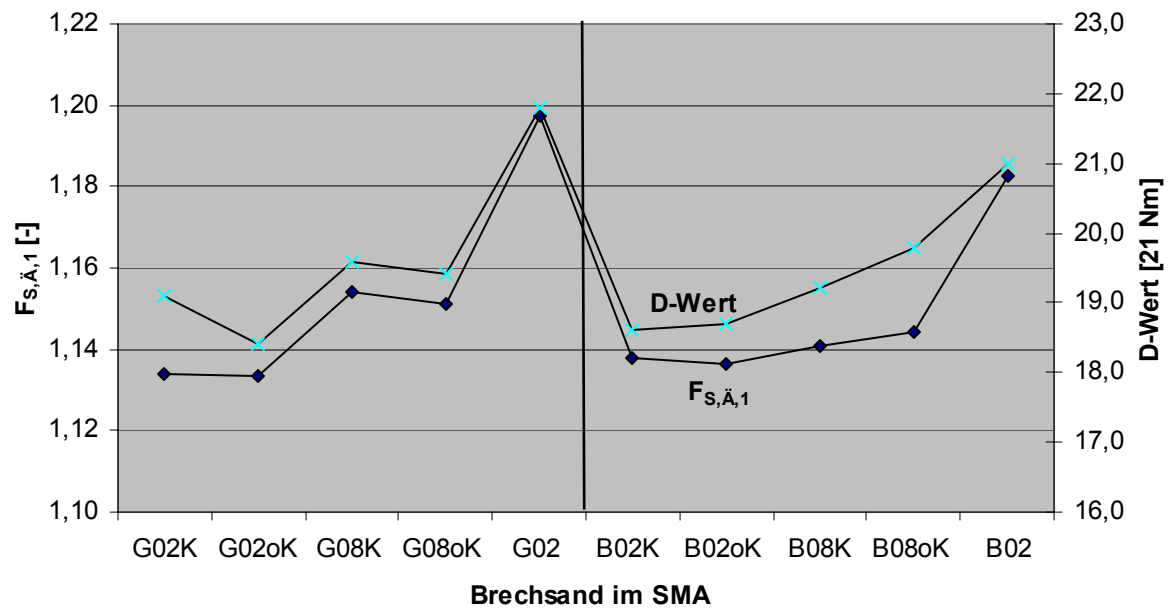
Abbildung 9-19: D-Wert der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )



**Abbildung 9-20: D-Wert der Splittmastixasphalte und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle**



**Abbildung 9-21: D-Wert der Splittmastixasphalte und beeinflussende photo-optische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )**



**Abbildung 9-22: D-Wert der Splittmastixasphalte und beeinflussende photo-optische Brechseigenschaft ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )**

#### 9.4 Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphalte

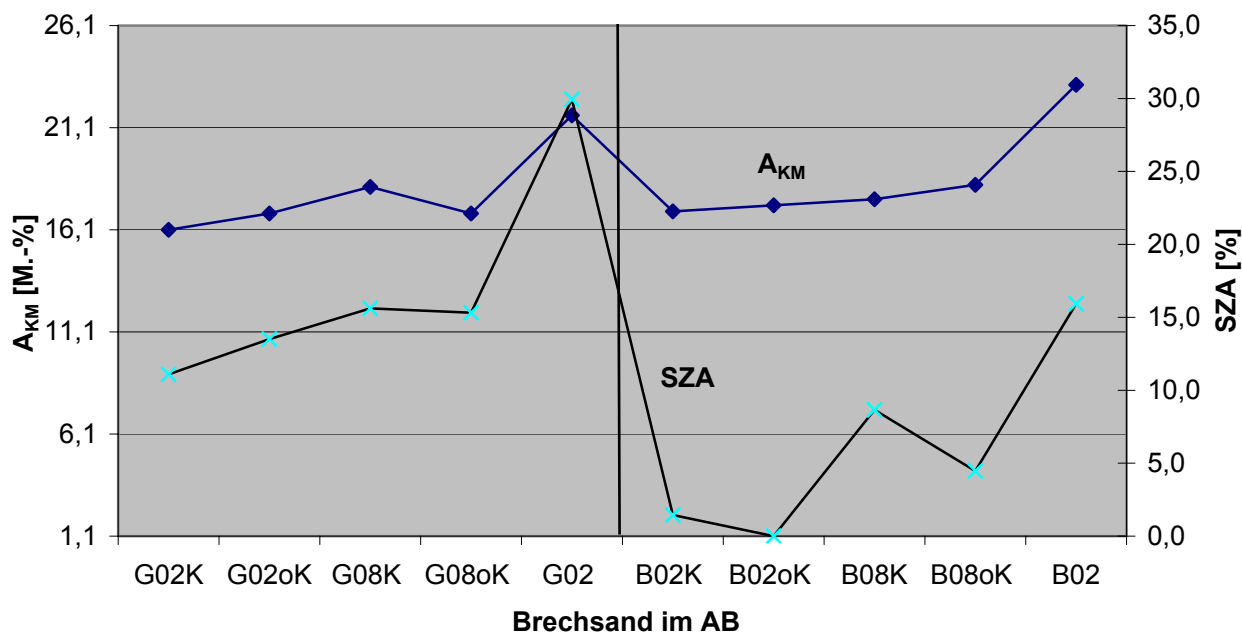
In den **Tabellen 9-9** und **9-10** ist der Einfluss der Brechseigenschaften auf den Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphalte anhand der Ergebnisse der multiplen linearen Regression angegeben. Die relevanten Variablen sind in den **Abbildungen 9-23** bis **9-28** graphisch dargestellt.

**Tabelle 9-9: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechseigenschaften und dem Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Asphaltbetone**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechseigenschaft; AV: SZA</b>									
<b>r</b>		0,958		<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>					
<b>UV</b>	<b>A<sub>KM</sub></b>		0,701	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	16,8	36,5			
<b>UV</b>	<b>Gestein</b>		0,779	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>					
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: SZA</b>									
<b>r</b>		0,967		<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>					
<b>UV</b>	<b>F<sub>S,F,2</sub></b>		0,944	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	455,0	747,5	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,79
<b>UV</b>	<b>D75/D25<sub>F</sub></b>		0,287	0,021	13,3	119,6	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,28
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: SZA</b>									
<b>r</b>		0,890		0,001			F <sub>S,Ä,2</sub>	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	0,67
<b>UV</b>	<b>F<sub>S,Ä,2</sub></b>		0,890	0,001	416,4	1005,1	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	F <sub>S,Ä,2</sub>	0,23

**Tabelle 9-10: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechseigenschaften und dem Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Splittmastixasphalte**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechseigenschaft; AV: SZA</b>									
r		0,930		<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>					
UV	<b>A<sub>KM</sub></b>		0,930	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	11,5	22,5			
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_F</math>; AV: SZA</b>									
r		0,927		<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>			F <sub>S,F,1</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,38
UV	<b>F<sub>S,F,1</sub></b>		0,927	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	101,8	202,5	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,1</sub>	0,23
<b>UV: Photooptische Brechseigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{A}}</math>; AV: SZA</b>									
r		0,925		0,001			F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	0,38
UV	<b>F<sub>S,Ä,1</sub></b>		0,900	<1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	107,0	239,0	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,23
UV	<b>Gestein</b>		0,368	0,039			F <sub>Kub,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,23



**Abbildung 9-23: SZA der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechseigenschaft Abrieb in der Kugelmühle**

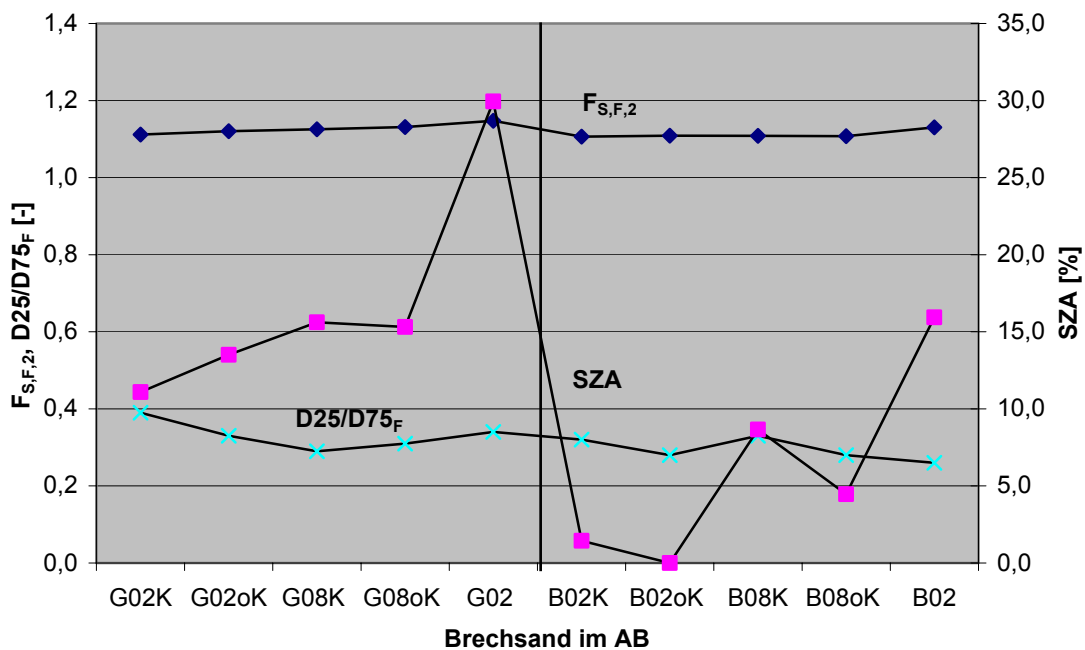


Abbildung 9-24: SZA der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )

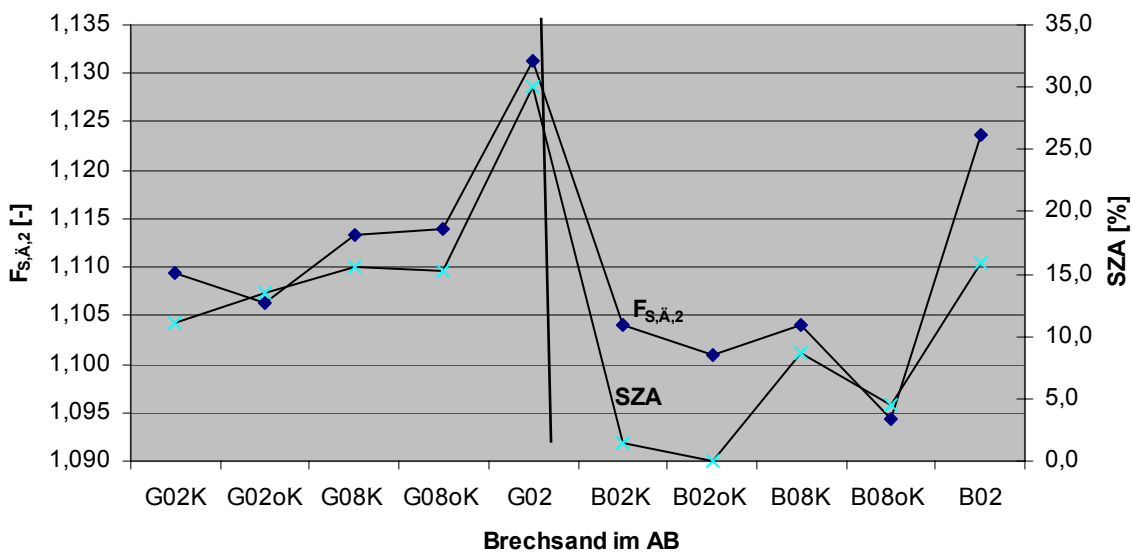
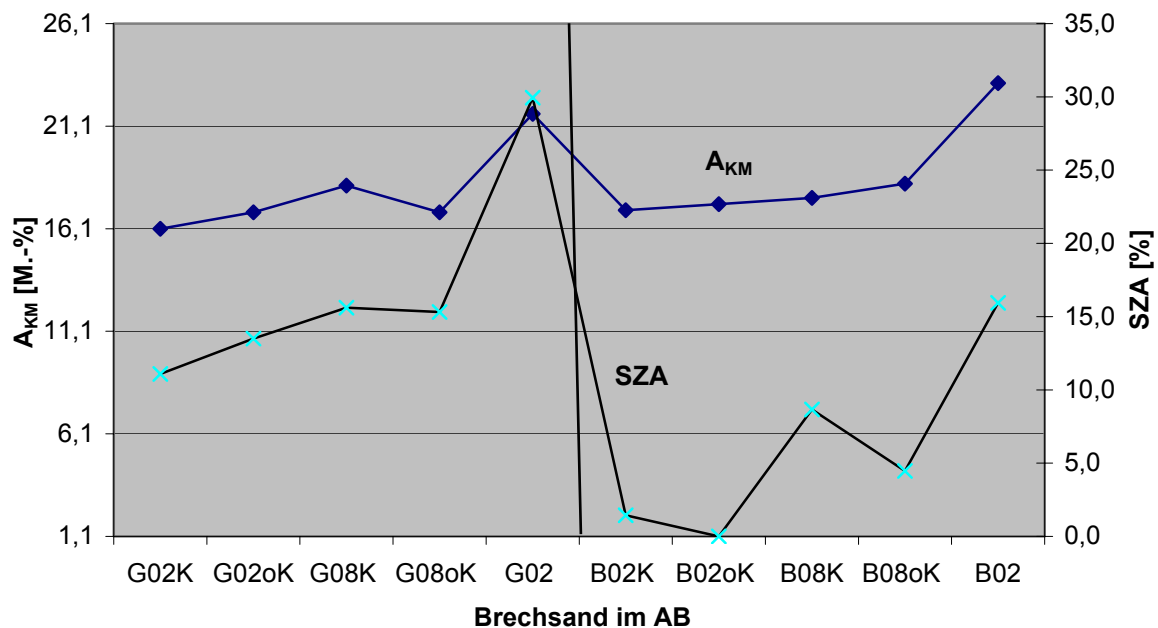
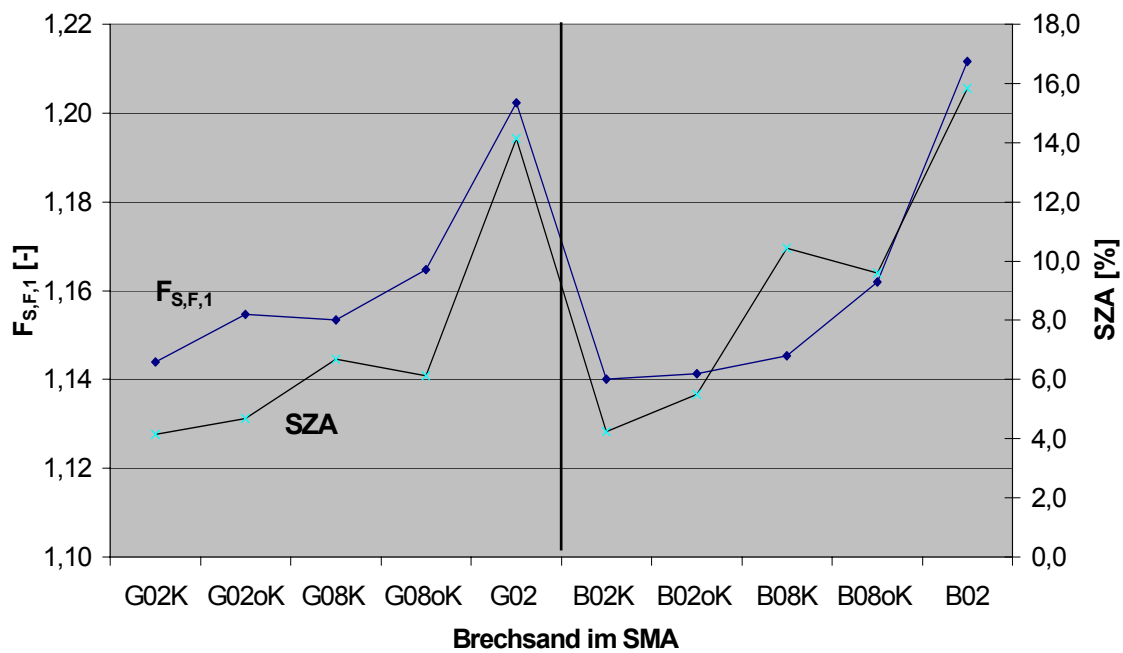


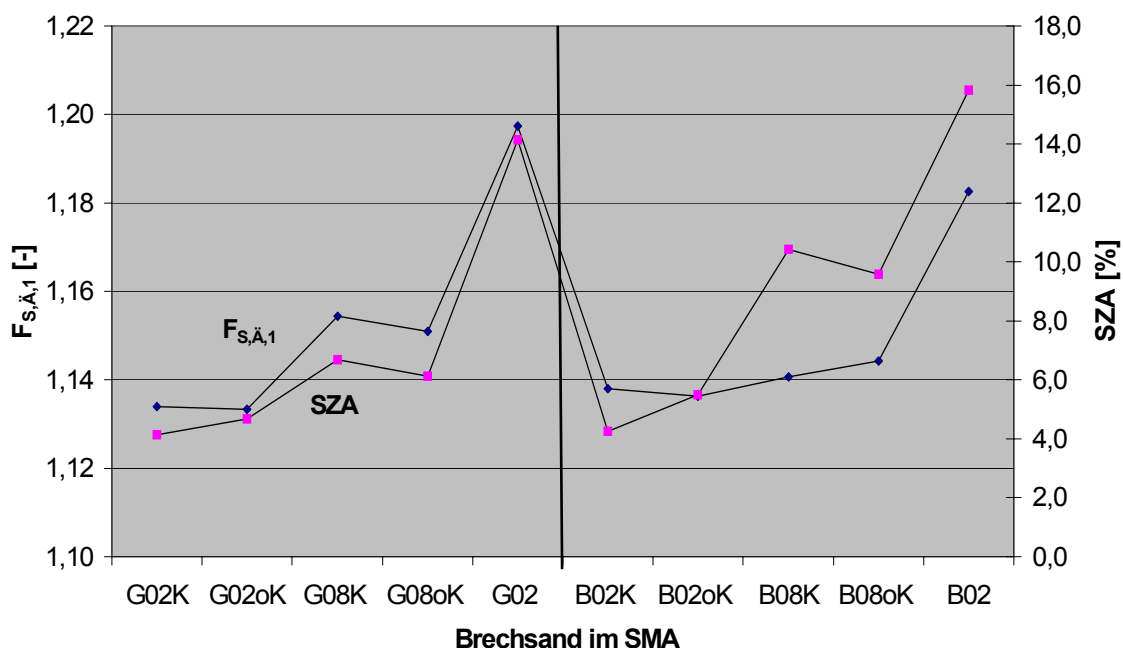
Abbildung 9-25: SZA der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )



**Abbildung 9-26: SZA der Splittmastixasphalte und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle**



**Abbildung 9-27: SZA der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_F$ )**



**Abbildung 9-28: SZA der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_{\ddot{A}}$ )**

### 9.5 Stabilität und Fließwert der Asphaltbetone

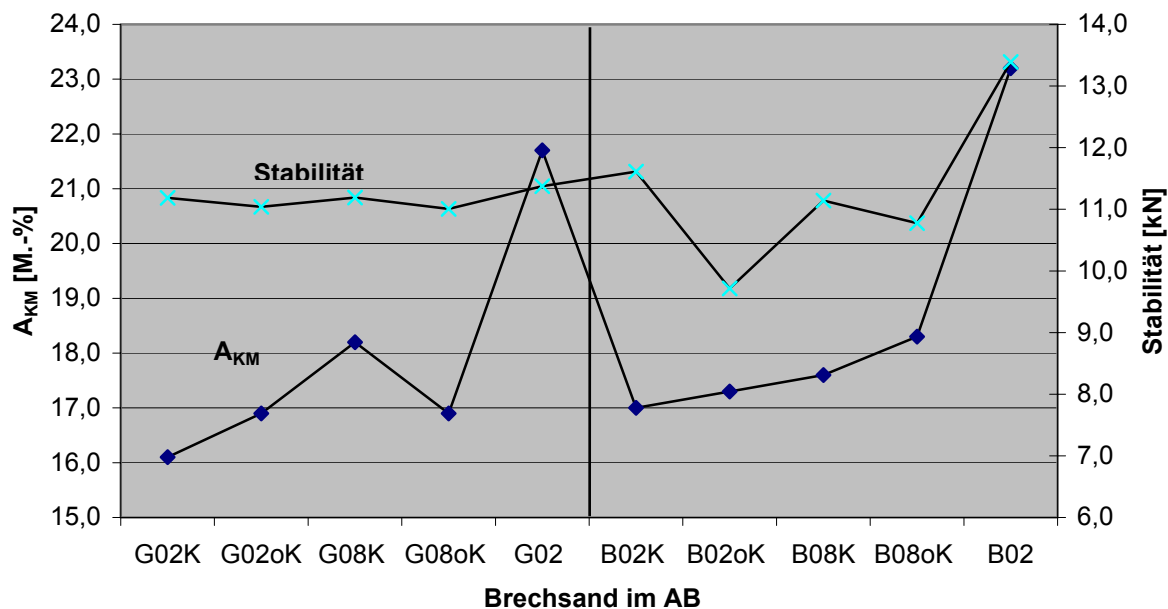
In **Tabelle 9-11** ist der Einfluss der Brechsandeigenschaften auf die Stabilität der Asphaltbetone anhand der Ergebnisse der multiplen linearen Regression angegeben. Unter den verwendeten Kriterien des verwendeten Regressionsalgorithmus konnte zwischen den Brechsandeigenschaften und den Fließwerten der Asphaltbetone kein linearer Zusammenhang berechnet werden.

Die relevanten Variablen sind in den **Abbildungen 9-29 bis 9-31** graphisch dargestellt.



**Tabelle 9-11: Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und der Stabilität der Asphaltbetone**

Parameter	Bezeichnung	Wert	$b_s$	Signif.	Konfidenzintervall		Partielle Korrelation		
					Min	Wert	Var	Var <sub>K</sub>	Wert
<b>UV: Mechanische Brechsandeigenschaft; AV: Stabilität</b>									
r		0,683		0,029					
UV	$A_{KM}$		0,683	0,029	0,35	5,1			
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_f</math>; AV: Stabilität</b>									
r		0,896		0,003			$F_{Kon,F,1}$	$F_{S,F,1}$	0,8
UV	$F_{Kub,F,1}$		-7,09	0,014	-144,7	-22,5			
UV	$F_{Kon,F,1}$		7,787	0,09	24,5	122,1	$F_{S,F,1}$	$F_{Kon,F,1}$	0,46
<b>UV: Photooptische Brechsandeigenschaft; <math>\delta=d_{\ddot{a}}</math>; AV: Stabilität</b>									
r		0,730		0,017			$F_{Kub,\ddot{A},3}$	$F_{Kon,\ddot{A},2}$	0,42
UV	$F_{Kub,\ddot{A},1}$	0,730		0,017	5,0	37,6	$F_{Kon,\ddot{A},2}$	$F_{Kub,\ddot{A},3}$	0,15



**Abbildung 9-29: Stabilität der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle**

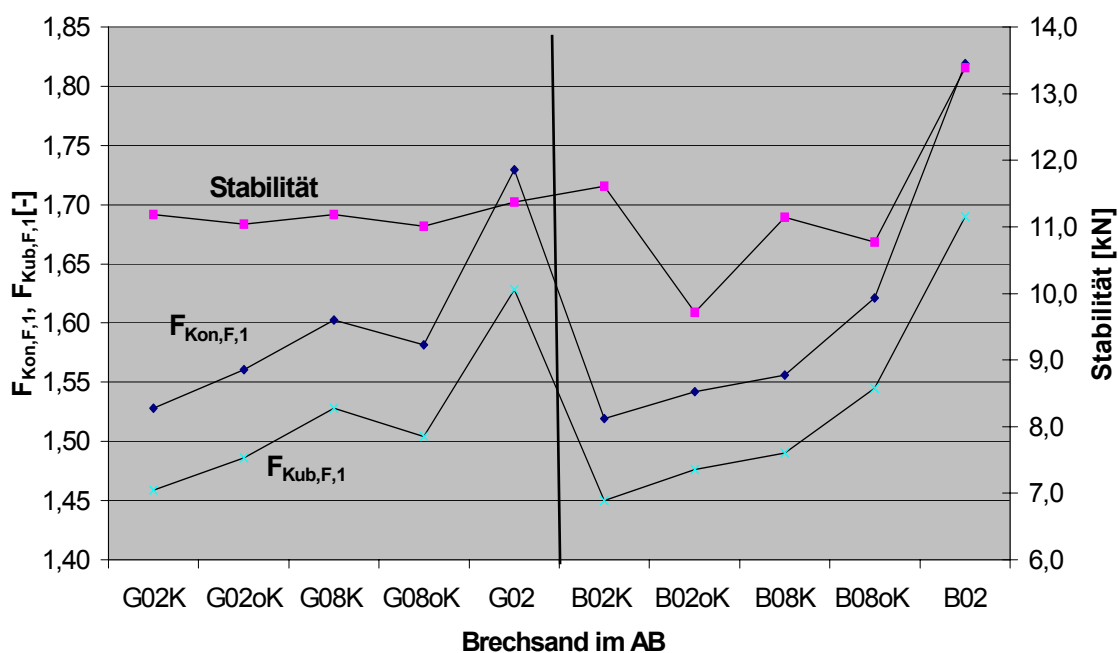


Abbildung 9-30: Stabilität der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ )

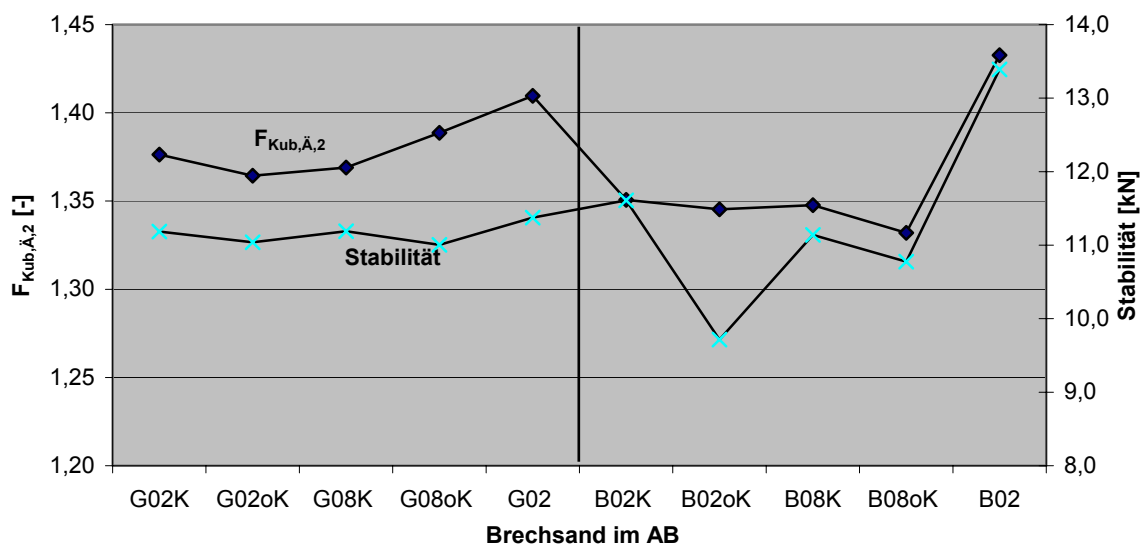


Abbildung 9-31: Stabilität der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ )

## 10 Beurteilung der Ergebnisse

### 10.1 Grauwacke- und Basaltbrechsande zur Verwendung in Asphalt

Die ermittelten absoluten Fließzahlen der untersuchten Brechsande erscheinen plausibel. In [3] wurden ähnliche Werte für Brechsande gefunden. Gemäß TP Min-StB [17] liegt die Wiederholgrenze zweier Fließzahlergebnisse mit einer statistischen Sicherheit von 95 % [40] bei 11 %. Das bedeutet, dass mit Ausnahme des Ergebnisses des Fließzahlversuchs am B02 sämtliche Differenzen der Versuchsergebnisse auf Streuungen aus der Probeteilung und aus der Prüfung zurückgeführt werden könnten. Die Fließzahl der untersuchten Brechsande als Bewertungsparameter ist daher als fragwürdig zu bewerten.

Der Abrieb der Brechsande in der Kugelmühle wurde offensichtlich von der Art ihrer Aufbereitung beeinflusst. Geringe Siebweiten des Trennschnitts wirkten sich mindernd auf den Abrieb aus. Die nur mit Kegelmühlern aufbereiteten Sande wiesen wesentlich höhere Abriebwerte auf. Der Abrieb in der Kugelmühle wird mit einer Signifikanz von unter 65 % von der Gesteinsart beeinflusst. Statistisch gesicherte Aussagen zur Spannweite der Ergebnisse liegen bisher nicht vor.

Die Brechsande entsprachen im Anlieferungszustand nicht den Anforderungen an Edelbrechsande gemäß TL Min-StB [2], da die Überkornanteile bei fast allen Sanden zu hoch waren (**Tabelle 6-1**). Die Sieblinien der von Unter- und Überkorn befreiten Brechsande haben einen ähnlichen Verlauf, was ein Vergleich der Ungleichförmigkeitszahlen unterstreicht (**Abbildung 6-3**). Durch die photooptische Bestimmung der volumetrischen Korngrößenverteilungen und der damit möglichen Erhöhung der Messpunkte konnten die Feinheitsmerkmale der Brechsande detaillierter dargestellt werden als bei der mechanischen (Sieb-)Analyse. Die für die lineare Re-gression erforderliche einparametrische Formulierung der Korngrößenverteilung wurde wegen der geringen Anzahl der Messpunkte bei der mechanischen Analyse auf die Ungleichförmigkeitszahl begrenzt.

Die Korngrößenverteilungen der Brechsande unterscheiden sich voneinander photooptisch wesentlich stärker als mechanisch bestimmt. Die Spannweite der mechanisch ermittelten Ungleichförmigkeitszahlen ist mit 0,05 (**Abbildung 6-3**) je Sand demnach auch geringer als die der photooptisch ermittelten mit bis zu 0,09 (**Abbildungen 6-10** und **6-11**). Die photooptisch gefundenen Parameter RRSB<sub>n</sub> haben eine Spannweite von über 25 % (**Abbildung 6-9**).

Die Ergebnisse der photooptischen Kornformanalyse deuten darauf hin, dass sich die Art der Aufbereitung auf die Kornform des hergestellten Brechsandes auswirkt. Kleinere Trennschnitte in der vierten Basalt- bzw. fünften Grauwacke-Brechstufe sowie eine Materialaufgabe ohne Kaskadenstrom führten meist zu relativ großen (ungünstigen) Kornformparametern. Dies gilt hauptsächlich für das Grobkorn der Sande,

wenn der Feret-Durchmesser als Korngrößendefinition festgelegt wurde. Kornformanalysen auf Grundlage des Äquivalentdurchmessers als Korngrößendefinition zeigten ebenfalls Abhängigkeiten von der Art der Aufbereitung, wenn auch weniger deutlich (**Abbildungen 6-17 bis 6-22**).

Je feiner die Korngrößenbereiche, desto geringer ist die Abhängigkeit der ermittelten Kornformparameter von der Aufbereitungsart. Dies hat zum Teil messtechnische Ursachen. Je kleiner die zu analysierende Partikelprojektionsfläche, desto ungenauer wird die photooptische Kornformbestimmung. Dennoch wurde festgestellt, dass die Werte der Kornformparameter in den verschiedenen Korngrößenklassen unterschiedlich untereinander korrelieren, was messtechnisch nicht begründbar ist. Die Art der Aufbereitung beeinflusst wahrscheinlich die Kornformen der verschiedenen Kornklassen unterschiedlich. Den ausschließlich mit Kegelbrechern hergestellten Brechsanden können im Feinbereich nahezu gleich große oder sogar niedrigere Kornformparameter zugeordnet werden als den anderen mit Vertikalprallbrecher hergestellten Sanden.

Bei der Kornanzahlverteilung (**Abbildungen 6-12 bis 6-16**) unterscheiden sich die Brechsande im Durchmesserbereich zwischen 0,2 und 0,063 mm am deutlichsten. Die Ursache ist möglicherweise die unterschiedliche Trennbarkeit des Unterkorns. Eine Abhängigkeit zur Aufbereitungsart ist nicht offensichtlich.

## 10.2 Asphalteigenschaften und funktionale Zusammenhänge mit den Brechsandeigenschaften

Die maximalen Korrelationen, die sich, für jeweils beide Korngrößendefinitionen, zwischen den Brechsand- und den Asphalteigenschaften ergaben, sind in **Tabelle 10-1** zusammengefasst.

Die minimalen fiktiven Hohlräume der Mineralstoffgemische wurden bei allen Asphaltbetonvarianten bei einem Bindemittelgehalt von 5,6 M.-% erreicht. Da bei diesem Bindemittelgehalt der Hohlraumgehalt bei vier von fünf Asphalten mit Basaltbrechsand über der Obergrenze gemäß ZTV Asphalt-StB [11] lag, wurde bei diesen Asphalten ein Bindemittelgehalt von 5,9 M.-% als optimal angenommen.

Der fiktive Hohlraumgehalt dieser Asphaltbetone ist offenbar abhängig von der Aufbereitungsart der darin verwendeten Brechsande. Die Spannweiten der Ergebnisse lassen sich nicht alleine mit den Streuungen aus der Probeteilung und der Probekörperherstellung begründen, da ausgehend von einer Wiederholgrenze für Raumdichten nach DIN 1996-7 [32] von 0,019 g/cm<sup>3</sup> sich eine Wiederholgrenze für den fiktiven Hohlraum von 0,6 Vol.-% ergibt. Damit liegt die Spannweite der ermittelten fiktiven Hohlräume der Asphaltbetone nach **Tabelle 7-3** mit 2 Vol.-% wesentlich höher.

Als optimaler Bindemittelgehalt wurde bei den Splittmastixasphalten mit Grauwackebrechsanden 6,1 M.-%, bei denen mit Basaltbrechsanden 6,5 M.-% angenommen

(Tabelle 7-4). Die Ergebnisse scheinen in einer ähnlichen Abhängigkeit zur Aufbereitungsart zu stehen wie die Ergebnisse bei den Asphaltbetonen.

**Tabelle 10-1: Maximale Korrelationen zwischen Brechsandeigenschaften und Eigenschaften von Asphaltbeton (AB) und Splittmastixasphalt (SMA)**

Asphalteeigenschaft		Max. Korrelation r von AB-Eigenschaft mit Brechsandparameter	Max. Korrelation r von SMA-Eigenschaft mit Brechsandparameter
Fiktiver Hohlraumgehalt	$H_{M,bit}$	<b>0,956</b> / $F_{S,F,2}$ (0,939 / $F_{S,Ä,1}$ )	<b>0,991</b> / $F_{Kub,Ä,2}$ , $F_{Kon,Ä,1}$ (0,954 / $F_{S,F,2}$ )
D-Wert		<b>0,827</b> / $F_{S,F,2}$ (0,757 / $F_{Kub,Ä,1}$ )	<b>0,964</b> / $F_{S,Ä,1}$ (0,938 / $F_{S,F,1}$ )
Verformungswiderstand im Druckschwellversuch	$\varepsilon_{10}$ bzw. $\varepsilon_4$	<b>0,992</b> / $F_{Kon,Ä,2}$ , $F_{Kon,Ä,3}$ (0,976 / $F_{Kub,F,1}$ , $F_{Kub,F,2}$ )	<b>0,752</b> / $F_{S,F,2}$ (0,724 / $F_{S,Ä,1}$ )
	$\varepsilon_w^*$	<b>0,914</b> / $F_{Kon,Ä,1}$ , $FG_{Ä}$ (0,836 / $F_{Kub,F,1}$ )	<b>0,881</b> / $FZ$ , $F_{S,Ä,1}$ (0,702 / $F_{S,F,1}$ )
Spaltzugfestigkeitsabfall	<b>SZA</b>	<b>0,967</b> / $F_{S,F,2}$ (0,958 / $A_{KM}$ )	<b>0,930</b> / $A_{KM}$ (0,927 / $F_{S,F,1}$ )
Stabilität		<b>0,896</b> / $F_{Kon,F,1}$ , $F_{Kub,F,1}$ (0,730 / $F_{Kub,Ä,2}$ )	n. b.

Bei der gleichen Wiederholgrenze wie bei den Asphaltbetonen ist die Aussagefähigkeit der erhaltenen Ergebnisse bei den Splittmastixasphalten weniger stark ausgeprägt, was besonders für die Ergebnisse des Splittmastixasphaltes unter Verwendung von Basaltbrechsand gilt (**Abbildung 7-4**). Der im Vergleich zum Asphaltbeton geringere Brechsandanteil im Splittmastixasphalt (**Tabelle 3-7**) macht dieses Ergebnis plausibel.

Die ermittelten Werte der fiktiven Hohlraumgehalte der Asphaltbetone und der Splittmastixasphalte korrelieren dabei unterschiedlich stark mit den Ergebnissen der photooptischen Kornformanalyse.

Die maximale Korrelation zwischen dem fiktivem Hohlraumgehalt des Asphaltbetons und den Brechsandeigenschaften ergab sich mit  $r=0,956$  unter Verwendung der Sphärizität  $F_{S,F,2}$  als Regressionsvariable (**Tabelle A5-1 im Anhang 5**). Für Splittmastixasphalte wurde sogar ein Wert von  $r=0,991$  erreicht. Die Regressionsvariablen sind hier die Kubizität  $F_{Kub,\ddot{A},2}$  und die Konkavität  $F_{Kon,\ddot{A},1}$ . Jedoch korreliert auch beim Splittmastixasphalt die Sphärizität  $F_{S,F,2}$  mit  $r=0,954$  mit dem fiktiven Hohlraumgehalt. Die Sphärizität zeigt sich somit als dominierender Einflussparameter auf den fiktiven Hohlraumgehalt der Asphalte.

Der große Einfluss der Gesteinsart (**Tabelle A4 im Anhang 4** mit  $F=17,61$ ) auf den fiktiven Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte lässt sich teilweise auf die geringe Ergebnisspannweite bei den SMA mit Basaltbrechsanden zurückführen.

Der minimale fiktive Hohlraumgehalt wird mit Brechsanden, die unter Verwendung des Vertikalprallbrechers hergestellt wurden, mit weniger Bindemittel erreicht als bei Verwendung der Sande aus der Kegelbrecherherstellung.

Asphaltbetone mit Grauwackebrechsanden konnten höher verdichtet werden als solche mit Basaltbrechsanden. Begünstigt wurde die hohe Verdichtung der Asphalte mit Grauwackebrechsand durch die relativ große Menge anhaftender Tonminerale an der Oberfläche dieser Brechsande.

Die ermittelten Verdichtungswiderstände (**Tabellen 7-9 und 7-10**) liegen gemäß dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt [29] im unteren Teil der Variationsbereiche. Die Asphalte ließen sich somit vergleichsweise leicht verdichten. Die Asphaltbetone mit Basaltbrechsand ließen sich geringfügig leichter verdichten als die mit Grauwackebrechsand. Gemäß dem genannten Merkblatt beträgt die Wiederholgrenze für zwei ermittelte Ergebnisse 11 %, sodass die ermittelten Werte für die Asphaltbetone mit Basaltbrechsand nur eine eingeschränkte Aussagefähigkeit besitzen, da hier die Gesamtspannweite der Ergebnisse ebenso nur ca. 10 % (bei 21 Nm) beträgt. Die Spannweite der Ergebnisse beim Splittmastixasphalt unterscheidet sich ebenfalls nicht wesentlich von der Wiederholgrenze dieser Prüfung. Jedoch lässt die gute Korrelation der Ergebnisse (**Tabelle A5-4 im Anhang 5**) mit der Sphärizität  $F_{S,\ddot{A},1}$  der verwendeten Brechsande ( $r=0,964$ ) darauf schließen, dass hier ein Einfluss der Brechsandeigenschaften und somit der Aufbereitungsart gegeben ist. Die maximale Korrelation zwischen dem Verdichtungswiderstand der Asphaltbetone und den Brechsandeigenschaften wurde mit der Regressionsvariablen  $F_{S,F,2}$  mit  $r=0,827$  gefunden. Der niedrigere Korrelationskoeffizient ergibt sich aus den schlecht korrelierenden Ergebnissen der Asphalte mit Basaltbrechsand (**Abbildungen 9-7 und 9-8**).

Die Ergebnisse der Untersuchungen im einaxialen Druckschwellversuch zeigen deutliche Abhängigkeiten zur Aufbereitungsart nur bei der Verformung  $\varepsilon_{10}$ . Die Variation des Kaskadenstroms wirkt sich gegensätzlich auf den Einfluss der Gesteinsart aus (**Abbildung 7-5**). Eine statistisch gesicherte Aussage zur Präzision der Untersu-

chungsergebnisse ist nicht möglich. Eine entsprechende Forschungsarbeit ist an der Universität Karlsruhe zur Zeit in Arbeit.

Die multiple lineare Regressionsrechnung ergab einen maximalen Einfluss der Konkavität ( $\delta=d_A$ ,  $r=0,992$ ) auf die Verformung  $\varepsilon_{10}$ . Aber auch die Kubizität ( $\delta=d_F$ ,  $r=0,976$ ) korreliert diesbezüglich auffällig gut (**Tabelle A5-1 im Anhang 5**). Der Feinheitsparameter  $RRSBn_A$  spielt ebenfalls eine geringe Rolle (**Tabelle A5-2 im Anhang 5**). Im Gegensatz zu den Verdichtungseigenschaften (fiktiver Hohlraumgehalt und Verdichtungswiderstand) scheint hier die Gedrungenheit der Brechsandkörner eine größere Rolle zu spielen, als die durch die Sphärizität auch berücksichtigte Form der Kornoberfläche. Der unterschiedliche Einfluss der Kornformparameter wurde durch die Ergebnisse einer partiellen Korrelationsanalyse bestätigt (**Tabellen A5-5 bis A5-8 im Anhang 5**).

Der Spaltzugfestigkeitsabfall nach Wasserlagerung wird bei allen untersuchten Asphalten offenbar von der Aufbereitungsart der Brechsande beeinflusst (**Abbildungen 7-9 und 7-10**). Der Einfluss der Gesteinsart ist bei den Asphaltbetonen deutlich höher als bei den Splittmastixasphalten (**Tabelle 7-14**). Die Festigkeitseinbußen sind dabei bei Asphalten mit herkömmlich hergestellten Brechsanden mehr als zweimal so hoch als bei den Asphalten mit anderen Brechsanden.

Statistisch gesicherte Aussagen zur Präzision des Prüfverfahrens können hier ebenfalls nicht gemacht werden. Die große Spannweite der Ergebnisse legt aber die Vermutung nahe, dass die Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung von den Brechsandeigenschaften abhängt.

Die ermittelten Stabilitäten (**Abbildung 7-11**) und Fließwerte (**Abbildung 7-12**) ergaben - nicht unerwartet - keinen erkennbaren Zusammenhang zur Aufbereitungsart. Die Ergebnisspannweite der Stabilitäten liegt bei rd. 30 %, die der Fließwerte noch darunter. Die Wiederholgrenze liegt gemäß DIN 1996-11 [31] bei 22 %. Die Aussagefähigkeit der Untersuchungsergebnisse ist somit sehr eingeschränkt.

Die Ermittlung einer Funktionalität zwischen den Brechsandeigenschaften und den Fließwerten war rechnerisch nicht möglich, da die Korrelationen zu schwach ausgeprägt waren.

Die multiple lineare Regressionsrechnung ergab zwischen den Stabilitäten der Asphaltbetone und den Regressionsvariablen  $F_{Kon,F,1}$  und  $F_{Kub,F,1}$  einen Korrelationskoeffizienten von  $r=0,896$ . Diese scheinbare Korrelation muss jedoch relativiert werden, da die Regressionsvariablen relativ hohe Fehlersignifikanzen besitzen (**Tabellen A5-1 und A5-2 im Anhang 5**).

### 10.3 Natursand, Kalkstein- und Basaltbrechsande zur Verwendung in Beton

Die Fließzahlen der untersuchten Brechsande können wie die der Brechsande zur Verwendung in Asphalt beurteilt werden. Die Fließzahl des Natursandes lag erwar-

tungsgemäß deutlich niedriger. Der Abrieb des Kalksteinbrechsandes in der Kugelmühle wurde offensichtlich nicht von der Art der Aufbereitung beeinflusst (**Abbildung 6-24**). Geringe Siebweiten des Trennschnitts wirkten sich dagegen mindernd auf den Abrieb der Basaltbrechsande aus. Die nur mit Kegelbrechern aufbereiteten Basaltbrechsande wiesen wesentlich höhere Abriebwerte auf als diejenigen, die mit dem Vertikalprallbrecher aufbereitet wurden.

Auch hier entsprachen die Brechsande im Anlieferungszustand nicht den Anforderungen an Edelbrechsande gemäß TL Min-StB [2], da die Überkornanteile bei fast allen Sanden zu hoch waren (**Tabelle 6-12**).

Alle Kalksteinbrechsande, die mit dem Vertikalprallbrecher hergestellt wurden, weisen eine ähnliche mechanisch ermittelte Korngrößenverteilung auf (**Abbildung 6-25**). Die Verteilung des konventionell hergestellten Kalksteinbrechsandes K02 weicht davon deutlich ab. Die Ungleichförmigkeitszahl ist mehr als doppelt so groß wie die der anderen Kalksteinbrechsande. Die Korngrößenverteilungen der Basaltbrechsande können als einander ähnlich betrachtet werden.

Photooptisch analysiert unterscheiden sich die Feinheitsmerkmale der Sande stärker als mechanisch analysiert. Die Merkmale des K02K unterscheiden sich in verschiedener Art und Weise analysiert besonders voneinander, da die photooptisch ermittelte Verteilung wesentlich enger gestuft ( $D_{25}/D_{75\bar{A}}=0,53$ ) ist als die mechanisch ermittelte ( $D_{25}/D_{75}=0,18$ ).

Eine gute Approximation an die photooptisch ermittelten Verteilungen gelang durch die RRSB-Verteilung (**Tabellen 6-15 und 6-16; Abbildung 6-30**). Ein Einfluss der Aufbereitungsart auf die Feinheitsmerkmale der untersuchten Brechsande ist nicht offensichtlich.

Die Ergebnisse der photooptischen Kornformanalyse deuten darauf hin, dass sich die Art der Aufbereitung auf die Kornform des hergestellten Basaltbrechsandes auswirkt. Kleinere Trennschnitte in der vierten Basalt-Brechstufe sowie eine Materialaufgabe ohne Kaskadenstrom führten meist zu relativ großen (ungünstigen) Kornformparametern. Dies gilt hauptsächlich für das Grobkorn der Sande, wenn der Ferret-Durchmesser als Korngrößendefinition zugrundegelegt wurde. Kornformanalysen auf der Grundlage des Äquivalentdurchmessers als Korngrößendefinition zeigten ebenfalls Abhängigkeiten von der Art der Aufbereitung, wenn auch weniger deutlich (**Abbildungen 6-34 bis 6-39**).

Auch hier wurde festgestellt, dass je feiner die Korngrößen desto geringer die Abhängigkeit der ermittelten Kornformparameter von der Aufbereitungsart ist. Die Art der Aufbereitung beeinflusst wahrscheinlich die Kornformen der verschiedenen Kornklassen unterschiedlich. Den ausschließlich mit Kegelbrechern hergestellten Brechsanden können im Feinbereich nahezu gleich große oder sogar niedrigere



Kornformparameter zugeordnet werden als den anderen mit Vertikalprallbrecher hergestellten Sanden.

Die Ergebnisse der Kornformanalysen der Kalksteinbrechsande unterscheiden sich in einigen Punkten von denen der Basaltbrechsande. Der Einfluss der Aufbereitungsart auf die verschiedenen Kornklassen ist hier unterschiedlicher. Wirkt sich ein gewählter größerer Trennschnitt auf das Grobkorn vergrößernd auf den Kornformparameter aus, so ist dies im Feinkornbereich genau umgekehrt. Auch ist der Einfluss der Aufbereitungsart auf die Sphärizitäten im Vergleich zu den Basaltbrechsanden relativ gering.

Für den untersuchten Natursand wurden die kleinsten Kornformparameter ermittelt. Der Natursand kann damit, wie zu vermuten, als gedrungener und glatter als die Brechsande beschrieben werden.

Die Ermittlung der Kornanzahlverteilungen der Brechsande ergab keine offensichtliche Abhängigkeit zur Aufbereitungsart.

#### **10.4 Auswirkungen der Sande in Beton**

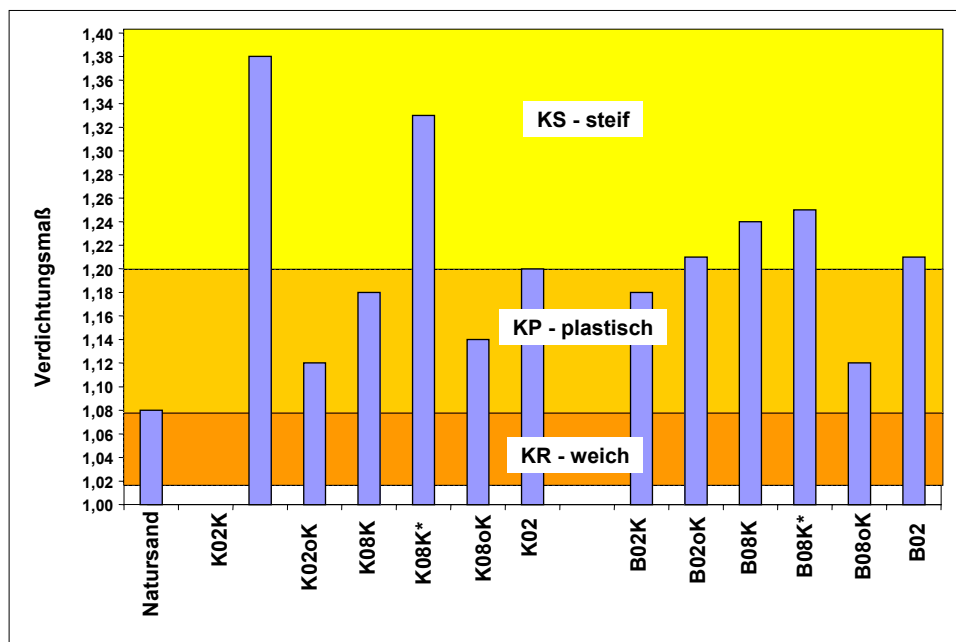
Ein numerischer Zusammenhang zwischen den Brechsand- und Betoneigenschaften war nicht abzuleiten. Dies liegt einerseits daran, dass aus Gründen der Systematik eine weitgehend einheitliche Korngrößenverteilung für das Zuschlaggemisch eingehalten werden sollte. Das bedingte in Verbindung mit den teils hohen Überkornanteilen jeweils unterschiedlich hohe Sandzugaben, während die Feinkornanteile  $< 0,063$  mm konstant gehalten wurden. Zum anderen wurden, wie vorgesehen, lediglich die Sandkörnungen 0,09 bis 2,0 mm einer photooptischen Analyse unterzogen. Die Bewertung der Ergebnisse der Betonuntersuchungen kann daher nur quantitativ in Verbindung mit den Sandeigenschaften erfolgen.

Der Beton mit Natursand hat erwartungsgemäß das geringste Verdichtungsmaß. Mit einem Wert von 1,09 hat dieser Beton die günstigste Konsistenz im Vergleich zu allen untersuchten Brechsanden, siehe **Abbildung 10-1**. Die Anwendung des Vertikalprallbrechers führt nicht bei allen Varianten zu einer günstigeren Verarbeitbarkeit der Betone im Vergleich zur klassischen Brechsandherstellung. Sowohl beim Basalt- als auch beim Kalksteinbrechsand hat sich die Variante 08oK (Trennschnitt 8 mm, kein Kaskadenstrom) als zweckmäßig erwiesen. Bei den übrigen Varianten muss jeweils Kalkstein bzw. Basalt getrennt betrachtet werden. Werden die Feinstanteile ( $< 63 \mu\text{m}$ ) nicht abgetrennt, führt dies zu steiferen Betonen als bei den Brechsanden mit den verringerten Feinstkorngehalten, wie die Ergebnisse unter Verwendung von K08K bzw. B08K zeigen.

Die Gehalte an Luftporen im Frischbeton bewegen sich zwar in üblicher Größenordnung, aber es wird auch deutlich, dass die steiferen Betone die höchsten LP-Gehalte aufweisen, wie in **Abbildung 10-2** gezeigt.

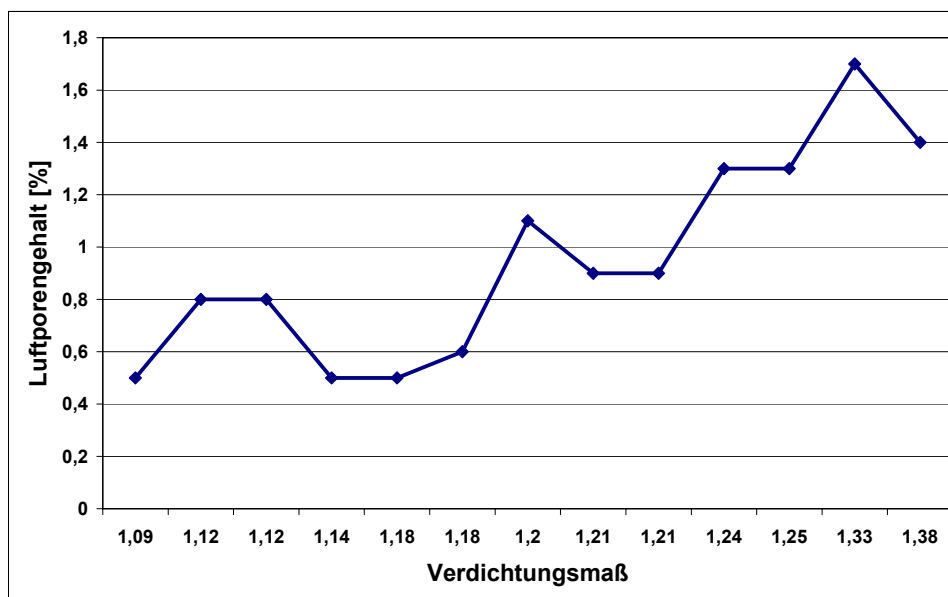
Bei der Verarbeitung der Betone mit Brechsand war aber auffällig, dass sie ein ausgeprägt thixotropes Verhalten zeigten, so dass sie sich trotz ihrer sehr steifen Konsistenz im Ruhezustand beim Eintrag von Verdichtungsenergie gut verdichten ließen.

Mit den höheren Zementgehalten und dem damit verbundenen höheren Zementleimgehalt beim B55 liegt der Beton mit dem Brechsand K02oK um eine Konsistenzklasse steifer als der Beton mit Natursand. Die beiden Betone mit Basaltbrechsand sind in ihrem Verarbeitungsverhalten geringfügig günstiger als der Beton mit Natursand.



\* Verwendung des Brechsands im Originalzustand, d.h. mit vollem Anteil an Mehlkorn

**Abbildung 10-1: Verdichtungsmaß der Betone B25**



**Abbildung 10-2: Zusammenhang zwischen Verdichtungsmaß und Luftporengehalt im Frischbeton B25**

Die Frühfestigkeiten (2 d) der Betone mit den Kalksteinbrechsanden sind höher als bei dem Vergleichsbeton mit Ausnahme des Brechsands K02 aus konventioneller Herstellung, aber auch höher als bei den Betonen mit Brechsanden aus Basalt. Unter Berücksichtigung einer Standardabweichung von etwa 1,4 sind Unterschiede bis etwa 3 MPa aber nicht signifikant.

Eine Systematik für einen Zusammenhang zwischen der Art der Aufbreitung der Brechsande und der Festigkeit der damit hergestellten Betone ist nicht erkennbar.

Die nach zwei Tagen noch vorhandenen Unterschiede zwischen den einzelnen Betonen können auf eine unterschiedliche Stützwirkung des Korngerüsts mit zurückgeführt werden. Mit zunehmender Festigkeit der Zementsteinmatrix werden die Einflüsse des Korngerüsts geringer und somit auch die relativen Unterschiede in den Festigkeiten der einzelnen Betone.

Die Spaltzugfestigkeiten liegen für übliche Betone zwischen 2 und 6 MPa, die von Splittbetonen im allgemeinen 10 bis 20 % über denen von Kiesbetonen. Die Werte der untersuchten Betone B25 betragen nach 28 Tagen 4,4 MPa für den Beton mit Natursand und Basaltsplitt und 3,5 bis 5,2 MPa für die Betone mit Brechsand und Basaltsplitt. Sie schwanken also um den Wert für den Beton mit Natursand. Dies ändert sich auch nach 90 Tagen Lagerung nicht. Wie bei den Druckfestigkeiten ist keine Abhängigkeit zur Art der Aufbereitung zu erkennen.

Der dynamische E-Modul hängt maßgeblich von drei Einflussgrößen ab und zwar vom E-Modul des Zementsteins, vom E-Modul der Zuschläge und vom Feuchtegehalt. Der E-Modul des Zementsteins wird in hohem Maß vom w/z-Wert bestimmt. Bei einem w/z-Wert von 0,7 beträgt der E-Modul des Zementsteins nach 28 Tagen

etwa 9000 MPa, bei einem w/z-Wert von 0,4 hingegen etwa 20000 MPa. Wassergesättigter Zementstein hat einen um etwa 10 % höheren E-Modul als trockener Zementstein. Wesentlich größer sind die Einflüsse durch den Zuschlag. Der E-Modul von Normalzuschlag liegt etwa zwischen 10000 MPa (Sandstein) und reicht bis etwa 90000 MPa (Basalt).

Mit zunehmender Druckfestigkeit nimmt der E-Modul zu. Aufgrund des starken Einflusses durch den Zuschlag nimmt der E-Modul prozentual mit steigender Druckfestigkeit aber nicht in gleichem Umfang zu. Beim Vergleich der Messwerte ist zu berücksichtigen, dass der erste Messwert nach 7 Tagen aufgrund der Nachbehandlung (1 Tag in der Schalung, 6 Tage unter Wasser) an den wassergesättigten Probekörpern erfolgte, während die späteren Messungen an Probekörpern erfolgten, die anschließend im Klimaraum lagerten. Dadurch erklärt sich, dass zwischen den Werten nach 7 und 14 Tagen trotz deutlicher Festigkeitszunahmen die Werte für den dynamischen E-Modul im allgemeinen nur geringfügig zunehmen.

Die Carbonatisierungstiefe der Probekörper zeigt keinerlei Abhängigkeiten zur Art der Brechsandaufbereitung.

Die Wassereindringtiefe darf 50 mm nicht übersteigen. Diese Forderung wird von allen Betonen zielsicher erfüllt.

## 11 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die Kornform der verwendeten Brechsande einen größeren Einfluss auf die Asphalteigenschaften hat als deren Korngrößenverteilung. Die maximalen Korrelationen zu den Asphalteigenschaften werden mit einer Ausnahme ( $\varepsilon_{10}$  bei Asphaltbeton) ausschließlich durch Kornformparameter erreicht. Außerdem wird nur in einem Fall (Spaltzugfestigkeitsabfall bei Splittmastixasphalt) eine maximale Korrelation durch einen mechanischen Brechsandparameter erzielt.

Neben den genannten statistischen Beurteilungskriterien sind die Konfidenzintervalle der betrachteten Regressionsparameter und die standardisierten Regressionskoeffizienten zu berücksichtigen. Die relativ großen Konfidenzintervalle verhinderten eine Formulierung des Einflusses der Brechsandeigenschaften in einer konkreten Funktionsform. Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsrechnung lieferten vielmehr die Möglichkeit, den Einfluss der betrachteten Parameter auf die Asphalteigenschaften numerisch abzuschätzen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die granulometrischen Bewertungskriterien, wie sie in den TL Min-StB [2] für Edelbrechsande 0/2 (F) vorgesehen sind, sinnvoll erweitert werden können. Sie enthalten zur Beurteilung der Granulometrie von Sanden ausschließlich Anforderungen an die Über- und Unterkornanteile. Spezifische Anforderungen an Kornklassen (hier: 0,09/2 mm) werden nicht gestellt. Die beschriebenen Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die granulometrischen Eigenschaften der Kornklassen und dabei insbesondere die photooptisch ermittelten Kornformparameter die Asphalteigenschaften beeinflussen.

Die Projektionsflächen von gebrochenen Gesteinskörnern bilden komplexe unregelmäßige Formen, deren Beschreibung durch eine Parameterschreibweise im sinnvollen Umfang noch nicht möglich ist. Zum Vergleich können einfache geometrische Formen wie Kreise oder Vierecke durch die Angabe von Radien oder Winkeln relativ einfach durch wenige Parameter eindeutig bestimmt werden.

Mit den verwendeten Kornformparametern ist es dagegen nicht möglich, die untersuchten Brechsande eindeutig und absolut zu beschreiben, da verschiedene Oberflächenmerkmale, wie z.B. Makrogestalt oder Kantigkeit in nicht nachvollziehbaren Relationen den Wert des Kornformparameters beeinflussen.

Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass es möglich ist, Brechsande aus derselben Provenienz durch die verwendeten Kornformparameter sinnvoll zu unterscheiden, um dadurch die Konsequenzen für die Asphalteigenschaften beschreiben zu können.

Die aufbereitungstechnisch bewirkte Spannweite der Brechsandeigenschaften hat gezeigt, dass es möglich ist, mit dem verwendeten Vertikalprallbrecher gezielt Brech-

sandeigenschaften zu erzwingen, die sich in Verbesserungen der Asphalteeigenschaften umsetzen lassen.

Die konsequente Fortsetzung der Untersuchungen hätte das Ziel, die Beschreibung der Gesteinskörner und den Einfluss auf die Asphalteeigenschaften weiter zu differenzieren. Dabei wären Methoden zu finden, die eine möglichst präzise Identifizierung einer Gesteinsform durch die Angabe von wenigen Parametern ermöglichen, deren Einfluss auf Asphalteeigenschaften quantifiziert werden könnten. Diese Erkenntnisse wären im nächsten Schritt aufbereitungstechnisch umzusetzen.

Bezüglich der Auswirkungen optimierter Brechsande in Beton muss festgestellt werden, dass der erhöhte Feinkorngehalt bei der Aufbereitung der Brechsande im Vertikalbrecher von Nachteil ist. Hier müsste noch nach Wegen gesucht werden, wie dies vermieden werden kann, da eine nachträgliche Abtrennung der Feinanteile vermutlich zu kostenaufwendig sein wird. Sicherlich steckt in der Trennschnitttechnik, die hierfür verantwortlich war, noch ein Verbesserungspotenzial.

Unabhängig davon hat sich gezeigt, dass vergleichbare Eigenschaften mit den optimierten Brechsanden bzw. mit Natursand erzielt werden können bei gleichem Zementgehalt.

## 12 Zusammenfassung

Zur Zeit werden im Betonbereich von der Naturstein-Industrie ca. 30 Mio. t Betonzuschlag eingesetzt, allerdings fast ausnahmslos nicht im Sandbereich, der in einer üblichen Betonzusammensetzung im Mittel 30 bis 40 % ausmacht. Zur Herstellung von Asphalt werden pro Jahr über 20 Mio t Sande benötigt. Der Anteil der Brechsande liegt z. Zt. bei etwa 50 %. Er ließe sich – geeignete Qualität vorausgesetzt – deutlich steigern.

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurden durch verschiedene Aufbereitungsmechanismen mit einem Vertikalprallbrecher aus drei Gesteinsprovenienzen (Grauwacke, Basalt und Kalkstein) jeweils fünf granulometrisch unterscheidbare Brechsande hergestellt und gekennzeichnet. Anschließend wurden die Einflüsse der Differenzen der Brechsandgranulometrien auf die Eigenschaften der damit hergestellten Asphalte und Betone analysiert. Neben mechanischen Sandprüfungen wurden photooptische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Sande herangezogen, wobei die statistischen Längen von Partikelprojektionsflächen bestimmt wurden. Neben der Ermittlung der volumetrischen Korngrößenverteilungen wurden durch Kombination dieser Längen Partikelformparameter (= Kornformparameter) definiert, um damit verschiedene Formeigenschaften der Brechsande beschreiben zu können. Mit den verwendeten Kornformparametern sollten Formeigenschaften wie Kreisförmigkeit und Gedrungenheit beschrieben werden.

Die photooptische Untersuchungsmethode lieferte deutlich bessere Ergebnisse zur Prognostizierung der Asphalteigenschaften als die mechanischen Eigenschaften der Brechsande. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Variation der Kornform der Brechsande einen größeren Einfluss auf die Asphalteigenschaften ausübt als die Variation der Korngrößenverteilung. Die maximalen Korrelationen zu den Asphalteigenschaften werden mit einer Ausnahme ausschließlich durch Kornformparameter erreicht.

Die Untersuchungen ergaben, dass verschiedene Asphalteigenschaften von unterschiedlichen Kornformparametern primär beeinflusst werden. So ist es möglich, Brechsande aus derselben Provenienz durch die photooptisch ermittelten Kornformparameter sinnvoll zu unterscheiden, um dadurch die Auswirkungen auf Asphalteigenschaften beschreiben zu können.

Im Unterschied zu den im Asphalt verwendeten Brechsanden wurden die Sande für die Betonherstellung mit dem produktionsbedingten Überkornanteil und in jeweils verschiedenen Anteilen den Betonrezepturen zugegeben, um dabei eine möglichst ähnliche Korngrößenverteilung wie bei der Standardrezeptur mit Natursand zu erreichen. Eine statistische Auswertung des Zusammenhangs zwischen Sand- und Be-

toneigenschaften war daher nicht möglich. Der Beton mit Natursand hat erwartungsgemäß das geringste Verdichtungsmaß und damit die günstigste Konsistenz im Vergleich zu allen untersuchten Brechsanden. Bei der Verarbeitung der Betone mit Brechsand war auffällig, dass sie ein ausgeprägt thixotropes Verhalten zeigten, so dass sie sich trotz ihrer sehr steifen Konsistenz im Ruhezustand gut verdichten ließen. Die ermittelten Festigkeiten der Betone, die mit Brechsand hergestellt wurden, sind tendenziell höher als die der Betone mit Standardrezeptur. Eine Abhängigkeit der Art der Aufbereitung der Sande von den Frisch- und Festbetoneigenschaften konnte jedoch statistisch nicht nachgewiesen werden.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen können bei der Herstellung von Brechsanden für Asphalte dazu verwendet werden, gezielt solche Kornformen für Brechsande herzustellen, die die Asphalteigenschaften insbesondere bezüglich des Verformungswiderstandes positiv beeinflussen. Für den Einsatz in Beton sind die Ergebnisse noch nicht so eindeutig. Insgesamt wird durch die Untersuchungen ein Weg aufgezeigt, wie die Qualität von Brechsanden gesteigert und damit auch die Wettbewerbssituation der Steinbruchbetreiber verbessert werden kann.



### 13 Literatur

- [1] DIN 4226-1 „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel“ Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen; Ausgabe Juli 2001
- [2] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau – TL Min-StB 2000; Ausgabe 2000; FGSV
- [3] Krass, K. u.a.: Beurteilung der versteifenden Wirkung von Sanden im Asphalt anhand der Fließzahl; Forschungsbericht FE-Nr. 07.132G87E des Bundesministers für Verkehr; Bochum im April 1990
- [4] Feix, R.: Brech- und Natursandeigenschaften und deren Bedeutung für die Asphalt- und Betontechnologie; Manuskript eines Vortrages anlässlich der Jahrestagung der bayerischen Sand- und Kiesindustrie; München 1986
- [5] Schicht, E.: Der Einsatz der BHS-Schleudermühle zur Erzeugung kubischen Endkorns; Aufbereitungs-Technik 38 (1997) Nr.: 1
- [6] Baumaschinen Taschenbuch; Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin; 1984
- [7] Schicht, E.: Eigenschaften und Einsatzgebiete von Rotormühlen; Aufbereitungs-Technik 39 (1998) Nr.: 10
- [8] Hudson, B.: Flour Power; Quarry, 10/1996
- [9] Schicht, E.: Rotormühlen. Eine Maschinengruppe für viele Einsatzfälle; Die Naturstein-Industrie 9/1997
- [10] Vertikal-Prallbrecher setzt neue Maßstäbe; Die Naturstein-Industrie 6/1999
- [11] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt – ZTV Asphalt-StB 01, Ausgabe 2001, FGSV
- [12] Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt; Ausgabe 1998; FGSV
- [13] DIN 52102 „Prüfungen von Naturstein und Gesteinskörnungen“ – Bestimmung von Dichte, Trockendichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität, Ausgabe August 1988
- [14] Hutschenreuther, Wörner: Asphalt im Straßenbau; Verlag für Bauwesen; 1998
- [15] DIN 1045 „Beton und Stahlbeton“ – Bemessung und Ausführung; Ausgabe Juli 1988
- [16] DIN EN 197-1 „Zement“ Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Ausgabe Februar 2001
- [17] Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – TP Min-StB Teil 3.7.2: Fließversuch an Sand; Ausgabe 1986; FGSV
- [18] Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – TP Min-StB Teil 5.4.2: Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle; Ausgabe 1982, FGSV
- [19] Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – TP Min-StB Teil 6.3.2: Korngrößenverteilung von Sand (Luftstrahlsiebung); Ausgabe 1982, FGSV
- [20] Dowdeswell, J. A.: Scanning electron micrographs of quartz sand grains from cold environments examined using Fourier Shape Analysis. In: Journal of Sedimentary Petrology 52 (1982) Nr. 4

- [21] Hodenberg, M. v.: Optimierung der Kies- und Sandgewinnung auf einem Baggerschiff durch vollautomatische Online-Korngrößenanalyse. In: Aufbereitungstechnik 41 (2000) Heft 12
- [22] Pahl, M.H. u.a.: Zusammenstellung von Teilchenformbeschreibungsmethoden. In: Aufb.-Techn. 14 (1973) Nr.10
- [23] Folgner, T., Unland, G.: Automatische Kornformbestimmung durch photooptische Partikelanalyse; Die Natursteinindustrie (1997) Heft 5
- [24] Church, T.: Problems Associated with the use of the ratio of Martin's Diameter to Feret's Diameter as a profile shape factor; Powder Technology 2 (1968/69)
- [25] Abrams, D.: Design of concrete mixtures. In: Newlon, H. (Hrsg.): A selection of historic american papers on concrete 1876-1926. Detroit 1976
- [26] DIN 1996-4 „Prüfung bituminöser Massen für den Strassenbau und verwandte Gebiete“ Teil 4: Herstellung von Probekörpern aus Mischgut, Ausgabe November 1984
- [27] Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau -TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Asphalten bei Wärme; Ausgabe 1999, FGSV
- [28] Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mit Hilfe des Marshall-Verfahrens; Ausgabe 1987, FGSV
- [29] Merkblatt für das Verdichten von Asphalt Teil 2: Theorie der Verdichtung; Ausgabe 1993, FGSV
- [30] Schlussbericht des Instituts für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig zum FA Nr. 7.133 G 87 E des BMV; Anhang III: Arbeitsanleitung für die Ansprache des Haftverhaltens zwischen Bindemittel und Mineralstoffen in einem verdichteten Asphalt; Februar 1991
- [31] DIN 1996-11 „Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete“ Teil 11: Bestimmung von Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert; Ausgabe Juli 1991
- [32] DIN 1996-7 „Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete“ Teil 7: Bestimmung von Dichte und Hohlraum; Ausgabe Dezember 1992
- [33] DIN 1048-1 „Prüfverfahren für Beton“ Teil 1: Frischbeton; Ausgabe Juni 1991
- [34] DIN 1048-5: „Prüfverfahren für Beton“ Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper; Ausgabe 1991
- [35] Bunke, N.: Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048; DAfStb Heft 422 (1991)
- [36] Grindo-Sonic Typ MK 42. Firmenschrift und Bedienungsanleitung J.W. Lemmens GmbH (1986).
- [37] Sachs, Lothar: Angewandte Statistik; 7. Auflage; Springer-Verlag 1992
- [38] SPSS for Windows; Release 10.07; SPSS Inc.; 2000
- [39] Backhaus, K.: Multivariate Analysemethoden; 5. Auflage; Springer-Verlag 1989
- [40] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 1: Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren; Ausgabe 2000, FGSV

- [41] Merkblatt für das Verdichten von Asphalt; Teil 2: Theorie der Verdichtung;  
Ausgabe 1993, FGSV

## 14 Verzeichnisse

### 14.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Leistung der Brechsandaufbereitung mit Vertikalprallbrecher und Stromaufnahme.....	6
Tabelle 3-2:	Letzte Brechstufe zur Herstellung der Brechsande .....	8
Tabelle 3-3:	Eigenschaften des verwendeten Kalksteinmehls .....	9
Tabelle 3-4:	Rohdichten der im Asphalt verwendeten Baustoffe.....	9
Tabelle 3-5:	Volumetrisch berechnete Anteile in den Mineralstoffgemischen für die beiden Asphalte.....	10
Tabelle 3-6:	Gravimetrische Zugabeanteile in den Mineralstoffgemischen für die beiden Asphalte.....	10
Tabelle 3-7:	Gravimetrische Bindemittelgehalte der Asphalte.....	10
Tabelle 3-8:	Eigenschaften des verwendeten Mehlkorns.....	12
Tabelle 3-9:	Allgemeine Randbedingungen für die Herstellung der Betone.....	13
Tabelle 3-10:	Betonrezepturen für die Vergleichsbetone B25 und B55.....	14
Tabelle 3-11:	Betonrezepturen für B25 .....	15
Tabelle 3-12:	Zusätzliche Betonrezepturen für B25 .....	16
Tabelle 3-13:	Betonrezepturen für B55 .....	16
Tabelle 4-1:	Berücksichtigte Partikelgrößenklassen der Sphärizitäten.....	22
Tabelle 4-2:	Berücksichtigte Partikelgrößenklassen der Kubizitäten.....	23
Tabelle 4-3:	Berücksichtigte Partikelgrößenklassen der Konkavitäten.....	23
Tabelle 4-4:	Kontrolllängen zur Bestimmung der volumetrischen Korngrößenverteilung.....	24
Tabelle 6-1:	Korngrößenverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt vor Absiebung von Über- und Unterkorn .....	29
Tabelle 6-2:	Korngrößenverteilung der Brechsande nach Absiebung von Über- und Unterkorn.....	30
Tabelle 6-3:	Volumetrische Korngrößenverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_F$ ).....	31
Tabelle 6-4:	Volumetrische Korngrößenverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_{\bar{\lambda}}$ ) .....	33
Tabelle 6-5:	Bivariate Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen den theoretischen und den festgestellten Verteilungen der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_F$ ).....	35
Tabelle 6-6:	Bivariate Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen den theoretischen und den festgestellten Verteilungen der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_{\bar{\lambda}}$ ).....	36
Tabelle 6-7:	Kornanzahlverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_F$ ).....	39
Tabelle 6-8:	Kornanzahlverteilung der Brechsande aus Grauwacke und Basalt ( $\delta = d_{\bar{\lambda}}$ ) .....	40
Tabelle 6-9:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{S,\delta,n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand .....	44
Tabelle 6-10:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{Kub,\delta,n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsande.....	46
Tabelle 6-11:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{Kon,\delta,n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand .....	47

Tabelle 6-12:	Korngrößenverteilung des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande.....	50
Tabelle 6-13:	Volumetrische Korngrößenverteilung des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande ( $\delta = d_F$ ) .....	53
Tabelle 6-14:	Volumetrische Korngrößenverteilung des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) .....	54
Tabelle 6-15:	Bivariate Bestimmtheitsmaße für die Approximation ( $\delta=d_F$ ) bei Natursand sowie bei den Kalkstein- und Basaltbrechsanden .....	56
Tabelle 6-16:	Bivariate Bestimmtheitsmaße für die Approximation ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) bei Natursand sowie bei den Kalkstein- und Basaltbrechsanden .....	56
Tabelle 6-17:	Kornanzahlverteilung ( $\delta = d_F$ ) des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	58
Tabelle 6-18:	Kornanzahlverteilung ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande.....	59
Tabelle 6-19:	Sphärizitäten $F_{S,F}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	61
Tabelle 6-20:	Sphärizitäten $F_{S,\bar{A}}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	61
Tabelle 6-21:	Kubizitäten $F_{Kub,F}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsand .....	63
Tabelle 6-22:	Kubizitäten $F_{Kub,\bar{A}}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	63
Tabelle 6-23:	Konkavitäten $F_{Kon,F}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	65
Tabelle 6-24:	Konkavitäten $F_{Kon,\bar{A}}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	65
Tabelle 7-1:	Hohlraumgehalte der Asphaltbetone .....	67
Tabelle 7-2:	Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte .....	67
Tabelle 7-3:	Fiktive Hohlraumgehalte der Asphaltbetone.....	69
Tabelle 7-4:	Fiktive Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte.....	69
Tabelle 7-5:	Einfaktorielle Varianzanalyse der fiktiven Hohlraumgehalte der Asphalt; Faktor: Gesteinsart.....	71
Tabelle 7-6:	Verformungseigenschaften der Asphaltbetone im einaxialen Druckschwellversuch.....	71
Tabelle 7-7:	Verformungseigenschaften der Splittmastixasphalte im einaxialen Druckschwellversuch.....	72
Tabelle 7-8:	Einfaktorielle Varianzanalyse der Verformungseigenschaften der Asphalt im einaxialen Druckschwellversuch; Faktor: Gesteinsart ...	73
Tabelle 7-9:	D-Wert der Asphaltbetone mit den Grauwacke- bzw. Basaltbrechsanden.....	74
Tabelle 7-10:	D-Wert der Splittmastixasphalte mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden.....	74
Tabelle 7-11:	Einfaktorielle Varianzanalyse der D-Werte der Asphalt.....	76
Tabelle 7-12:	Spaltzugfestigkeitsabfall der Asphaltbetone bei optimalem Bindemittelgehalt mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden .....	76
Tabelle 7-13:	Spaltzugfestigkeitsabfall der Splittmastixasphalte bei optimalem Bindemittelgehalt mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden .....	76
Tabelle 7-14:	Einfaktorielle Varianzanalyse des SZA der Asphalt .....	78
Tabelle 7-15:	Stabilitäten der Asphaltbetone mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden.....	78

Tabelle 7-16:	Fließwerte der Asphaltbetone mit den Grauwacke- und Basaltbrechsanden.....	78
Tabelle 7-17:	Einfaktorielle Varianzanalyse der Stabilitäten und Fließwerte der Asphaltbetone .....	80
Tabelle 8-1:	Frischbetoneigenschaften der Betone B25 .....	81
Tabelle 8-2:	Frischbetoneigenschaften der Betone B55 .....	81
Tabelle 8-3:	Festbetoneigenschaften der Betone B25 .....	82
Tabelle 8-4:	Festbetoneigenschaften der Betone B55 .....	83
Tabelle 9-1:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem fiktiven Hohlraumgehalt der Asphaltbetone .....	84
Tabelle 9-2:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem fiktiven Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte.....	85
Tabelle 9-3:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und der Dehnung des Asphaltbetons nach 10 kLW ( $\varepsilon_{10}$ ) ....	89
Tabelle 9-4:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den photooptischen Brechsandeigenschaften und der Dehnung des Splittmastixasphaltes nach 4 kLW ( $\varepsilon_4$ ).....	89
Tabelle 9-5:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und der Dehnungsrate $\varepsilon_w^*$ des Asphaltbetons .....	93
Tabelle 9-6:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den photooptischen Brechsandeigenschaften und der Dehnungsrate $\varepsilon_w^*$ des Splittmastixasphaltes.....	94
Tabelle 9-7:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem Verdichtungswiderstand (D-Wert) der Asphaltbetone .....	97
Tabelle 9-8:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem Verdichtungswiderstand (D-Wert) der Splittmastixasphalte .....	98
Tabelle 9-9:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Asphaltbetone .....	102
Tabelle 9-10:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und dem Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Splittmastixasphalte .....	103
Tabelle 9-11:	Funktionaler Zusammenhang zwischen den Brechsandeigenschaften und der Stabilität der Asphaltbetone.....	107
Tabelle 10-1:	Maximale Korrelationen zwischen Brechsandeigenschaften und Eigenschaften von Asphaltbeton (AB) und Splittmastixasphalt (SMA).....	111

## 14.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Fließschema der durchgeführten Untersuchungen.....	4
Abbildung 3-1:	Aufbereitungsstufen der Brechsandherstellung .....	7
Abbildung 3-2:	Sieblinien der Asphaltbetone 0/11 S.....	11
Abbildung 3-3:	Sieblinien der Splittmastixasphalte 0/11 S.....	11
Abbildung 3-4:	Sieblinie mit Natursand.....	17
Abbildung 3-5:	Sieblinie mit B02.....	17
Abbildung 3-6:	Sieblinie mit B08oK.....	18
Abbildung 3-7:	Sieblinie mit K02.....	18
Abbildung 3-8:	Sieblinie mit K08oK.....	19
Abbildung 4-1:	Messprinzip eines CPA-Gerätes mit CCD-Zeilenkamera.....	21
Abbildung 4-2:	Statistische Längen im Vergleich.....	22
Abbildung 6-1:	Fließzahl der Brechsande aus Grauwacke und Basalt .....	28
Abbildung 6-2:	Abrieb in der Kugelmühle der Brechsande aus Grauwacke und Basalt.....	29
Abbildung 6-3:	Ungleichförmigkeitszahlen D25/D75 der Brechsande aus Grauwacke und Basalt.....	30
Abbildung 6-4:	Korngrößenverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_F$ ).....	32
Abbildung 6-5:	Korngrößenverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_F$ ).....	32
Abbildung 6-6:	Korngrößenverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_{\check{A}}$ ).....	34
Abbildung 6-7:	Korngrößenverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_{\check{A}}$ ).....	34
Abbildung 6-8:	Approximation der theoretischen an die tatsächliche Verteilung für den Grauwackebrechsand.....	37
Abbildung 6-9:	Vergleich der RRSBn-Parameter für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt.....	37
Abbildung 6-10:	Vergleich von $D25/D75_F$ und $FG_F$ für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt.....	38
Abbildung 6-11:	Vergleich von $D25/D75_{\check{A}}$ und $FG_{\check{A}}$ für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt.....	38
Abbildung 6-12:	Kornanzahlverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_F$ ).....	41
Abbildung 6-13:	Kornanzahlverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_F$ ) .....	41
Abbildung 6-14:	Kornanzahlverteilung der Grauwackebrechsande ( $\delta = d_{\check{A}}$ ).....	42
Abbildung 6-15:	Kornanzahlverteilung der Basaltbrechsande ( $\delta = d_{\check{A}}$ ).....	42
Abbildung 6-16:	Kornanzahlverteilungsquotient $QKA_{\delta}$ für die Brechsande aus Grauwacke und Basalt.....	43
Abbildung 6-17:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{S,F,n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand.....	44
Abbildung 6-18:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{S,\check{A},n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand.....	45
Abbildung 6-19:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{Kub,F,n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand.....	46
Abbildung 6-20:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{Kub,\check{A},n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand.....	47
Abbildung 6-21:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{Kon,F,n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand.....	48
Abbildung 6-22:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter $F_{Kon,\check{A},n}$ für Grauwacke- und Basaltbrechsand.....	48
Abbildung 6-23:	Fließzahl von Natursand sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	49

Abbildung 6-24:	Abrieb in der Kugelmühle von Natursand sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	50
Abbildung 6-25:	Korngrößenverteilung des Natursandes und der Kalksteinbrechsande .....	51
Abbildung 6-26:	Korngrößenverteilung der Basaltbrechsande.....	51
Abbildung 6-27:	Ungleichförmigkeit D25/D75 des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	52
Abbildung 6-28:	Korngrößenverteilung des Natursandes und der Kalksteinbrechsande ( $\delta = d_F$ ) .....	54
Abbildung 6-29:	Korngrößenverteilung ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) des Natursandes sowie der Kalksteinbrechsande.....	55
Abbildung 6-30:	Vergleich der RRSBn-Parameter bei Natursand sowie bei den Kalkstein- und Basaltbrechsanden .....	57
Abbildung 6-31:	Vergleich der D25/D75-Parameter für den Natursand sowie die Kalkstein- und Basaltbrechsande.....	57
Abbildung 6-32:	Kornanzahlverteilung des Natursandes und des Kalksteinbrechsandes ( $\delta = d_F$ ).....	60
Abbildung 6-33:	Kornanzahlverteilung des Natursandes und des Kalksteinbrechsandes ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) .....	60
Abbildung 6-34:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Sphärizitäten $F_{S,F,n}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	62
Abbildung 6-35:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Sphärizitäten $F_{S,\bar{A},n}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	62
Abbildung 6-36:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Kubizitäten $F_{Kub,F}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	64
Abbildung 6-37:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Kubizitäten $F_{Kub,\bar{A}}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	64
Abbildung 6-38:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Konkavitäten $F_{Kon,F}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	66
Abbildung 6-39:	Mittelwerte der zusammengefassten Parameter für die Konkavitäten $F_{Kon,\bar{A}}$ des Natursandes sowie der Kalkstein- und Basaltbrechsande .....	66
Abbildung 7-1:	Hohlraumgehalte der Asphaltbetone .....	68
Abbildung 7-2:	Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte.....	68
Abbildung 7-3:	Fiktive Hohlraumgehalte der Asphaltbetone .....	70
Abbildung 7-4:	Fiktive Hohlraumgehalte der Splittmastixasphalte .....	70
Abbildung 7-5:	Verformungseigenschaften der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt im einaxialen Druckschwellversuch .....	72
Abbildung 7-6:	Verformungseigenschaften der Splittmastixasphalte mit optimalem Bindemittelgehalt im einaxialen Druckschwellversuch .....	73
Abbildung 7-7:	D-Werte der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt.....	75
Abbildung 7-8:	D-Werte der Splittmastixasphalte mit optimalem Bindemittelgehalt .....	75
Abbildung 7-9:	Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt.....	77



Abbildung 7-10:	Spaltzugfestigkeitsabfall (SZA) der Splittmastixasphalte mit optimalem Bindemittelgehalt.....	77
Abbildung 7-11:	Stabilitäten der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt ..	79
Abbildung 7-12:	Fließwerte der Asphaltbetone mit optimalem Bindemittelgehalt ..	79
Abbildung 9-1:	Fiktiver Hohlraumgehalt der Asphaltbetone und ihn beeinflussende Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	85
Abbildung 9-2:	Fiktiver Hohlraumgehalt der Asphaltbetone und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ ).....	86
Abbildung 9-3:	Fiktiver Hohlraumgehalt der Asphaltbetone und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ).....	86
Abbildung 9-4:	Fiktiver Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte und ihn beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	87
Abbildung 9-5:	Fiktiver Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ ) ....	87
Abbildung 9-6:	Fiktiver Hohlraumgehalt der Splittmastixasphalte und ihn beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) .....	88
Abbildung 9-7:	$\varepsilon_{10}$ und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle.....	90
Abbildung 9-8:	$\varepsilon_{10}$ und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_F$ ) .....	90
Abbildung 9-9:	$\varepsilon_{10}$ und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ).....	91
Abbildung 9-10:	$\varepsilon_4$ und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_F$ ) .....	91
Abbildung 9-11:	$\varepsilon_4$ und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaften ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ).....	92
Abbildung 9-12:	$\varepsilon_w^*$ der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	94
Abbildung 9-13:	$\varepsilon_w^*$ der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ ).....	95
Abbildung 9-14:	$\varepsilon_w^*$ der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ).....	95
Abbildung 9-15:	$\varepsilon_w^*$ der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ ).....	96
Abbildung 9-16:	$\varepsilon_w^*$ der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ).....	96
Abbildung 9-17:	D-Wert der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	98
Abbildung 9-18:	D-Wert der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ ).....	99
Abbildung 9-19:	D-Wert der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ).....	99
Abbildung 9-20:	D-Wert der Splittmastixasphalte und beeinflussende mechanische Brechsandeigenschaft Abrieb in der Kugelmühle	100
Abbildung 9-21:	D-Wert der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_F$ ) .....	100
Abbildung 9-22:	D-Wert der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechsandeigenschaft ( $\delta = d_{\bar{A}}$ ) .....	101

Abbildung 9-23:	SZA der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechseigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	103
Abbildung 9-24:	SZA der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechseigenschaft ( $\delta = d_F$ ).....	104
Abbildung 9-25:	SZA der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechseigenschaft ( $\delta = d_A$ ).....	104
Abbildung 9-26:	SZA der Splittmastixasphalte und beeinflussende mechanische Brechseigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	105
Abbildung 9-27:	SZA der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechseigenschaften ( $\delta = d_F$ ) .....	105
Abbildung 9-28:	SZA der Splittmastixasphalte und beeinflussende photooptische Brechseigenschaften ( $\delta = d_A$ ) .....	106
Abbildung 9-29:	Stabilität der Asphaltbetone und beeinflussende mechanische Brechseigenschaft Abrieb in der Kugelmühle .....	107
Abbildung 9-30:	Stabilität der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechseigenschaft ( $\delta = d_F$ ) .....	108
Abbildung 9-31:	Stabilität der Asphaltbetone und beeinflussende photooptische Brechseigenschaft ( $\delta = d_A$ ) .....	108
Abbildung 10-1:	Verdichtungsmaß der Betone B25.....	116
Abbildung 10-2:	Zusammenhang zwischen Verdichtungsmaß und Luftporengehalt im Frischbeton.....	117

# Anhänge

**Inhaltsverzeichnis**

- Anhang 1: Sphärizitäten der Brechsande
- Anhang 2: Kubizitäten der Brechsande
- Anhang 3: Konkavitäten der Brechsande
- Anhang 4: Ergebnisse der statistischen Auswertung  
der Untersuchungsergebnisse
- Anhang 5: Ergebnisse der Regressionsanalysen

## Sphärizitäten der Brechsande

Tabelle A1-1: Sphärizitäten  $F_{s,F}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

Kornklasse	$F_{s,F}$									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,15	1,164	1,161	1,179	1,218	1,146	1,148	1,150	1,182	1,241
2,000-1,600	1,147	1,156	1,154	1,171	1,205	1,145	1,142	1,149	1,161	1,216
1,600-1,000	1,135	1,144	1,145	1,144	1,184	1,129	1,134	1,137	1,143	1,178
1,000-0,710	1,119	1,128	1,132	1,137	1,161	1,115	1,118	1,117	1,116	1,147
0,710-0,630	1,11	1,120	1,124	1,131	1,146	1,105	1,107	1,106	1,106	1,128
0,630-0,500	1,106	1,114	1,120	1,126	1,136	1,099	1,102	1,102	1,101	1,116
0,500-0,400	1,095	1,100	1,106	1,112	1,115	1,085	1,085	1,093	1,090	1,095
0,400-0,315	1,081	1,083	1,087	1,091	1,091	1,073	1,073	1,079	1,078	1,076

Tabelle A1-2: Sphärizitäten  $F_{s,\ddot{A}}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

Kornklasse	$F_{s,\ddot{A}}$									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,135	1,134	1,162	1,162	1,22	1,143	1,146	1,163	1,153	1,194
2,000-1,600	1,136	1,137	1,16	1,151	1,202	1,141	1,138	1,132	1,156	1,189
1,600-1,000	1,131	1,129	1,141	1,14	1,17	1,13	1,125	1,127	1,124	1,165
1,000-0,710	1,119	1,116	1,122	1,121	1,145	1,113	1,112	1,112	1,104	1,141
0,710-0,630	1,109	1,105	1,113	1,113	1,13	1,104	1,101	1,104	1,094	1,123
0,630-0,500	1,1	1,098	1,105	1,108	1,119	1,095	1,09	1,096	1,085	1,107
0,500-0,400	1,089	1,087	1,097	1,099	1,103	1,082	1,076	1,087	1,075	1,09
0,400-0,315	1,075	1,073	1,083	1,087	1,083	1,069	1,064	1,072	1,066	1,071

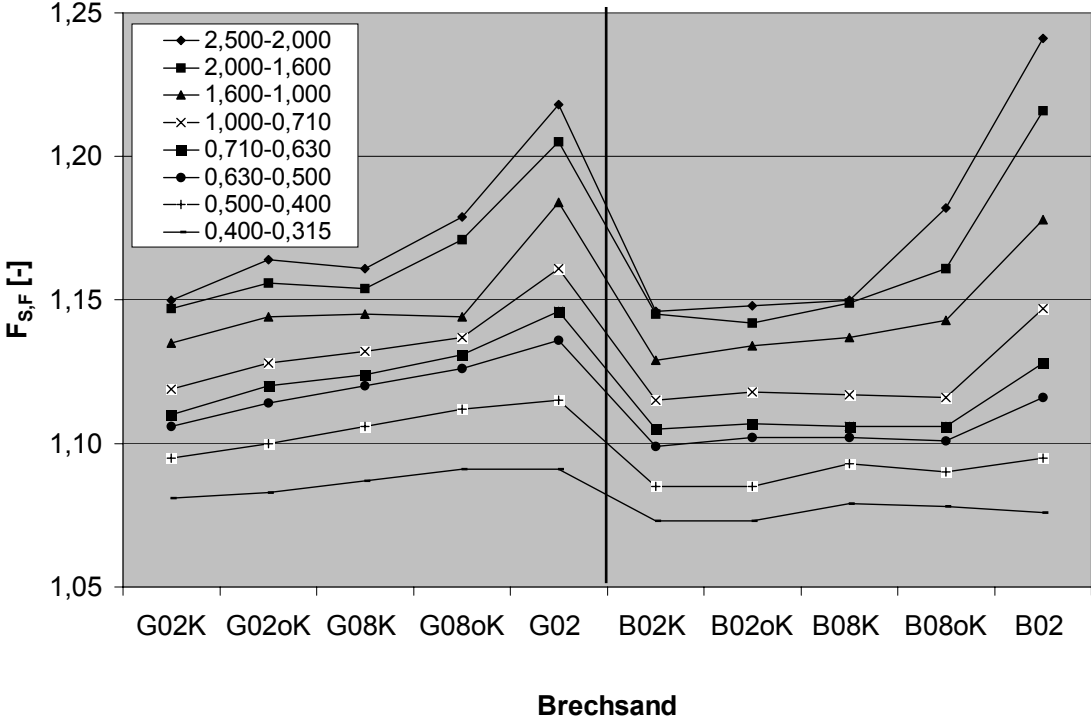


Abbildung A1-1: Sphärizitäten  $F_{S,F}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

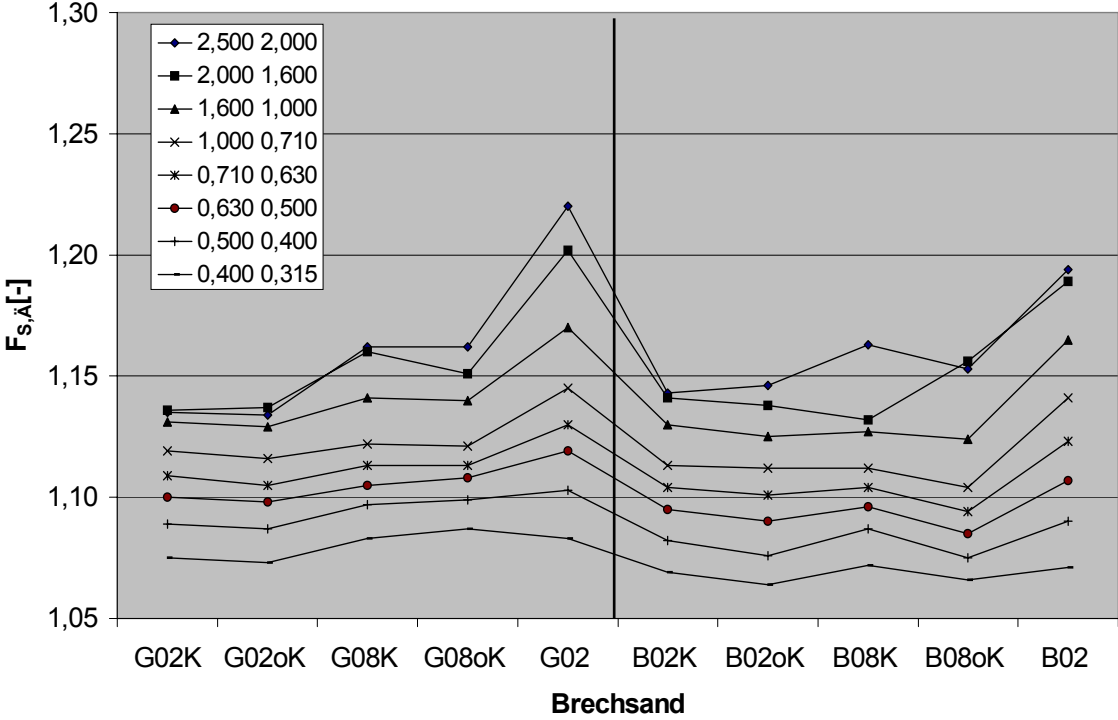


Abbildung A1-2: Sphärizitäten  $F_{S,Ä}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

Tabelle A1-3: Bivariate Korrelation der Sphärizitäten  $F_{S,F}$ 

		$F_{S,F}$ 2,5-2,0	$F_{S,F}$ 2,0-1,6	$F_{S,F}$ 1,6-1,0	$F_{S,F}$ 1,0-0,71	$F_{S,F}$ 0,71-0,63	$F_{S,F}$ 0,63-0,5	$F_{S,F}$ 0,5-0,4	$F_{S,F}$ 0,4-0,315
$F_{S,F}$ 2,5-2,0	Korrel. Signif.	1,000 0,000	0,986 0,000	0,941 0,000	0,829 0,003	0,719 0,019	0,608 0,062	0,432 0,212	0,263 0,463
$F_{S,F}$ 2,0-1,6	Korrel. Signif.		1,000 0,000	0,963 0,000	0,887 0,001	0,784 0,007	0,678 0,031	0,504 0,137	0,328 0,355
$F_{S,F}$ 1,6-1,0	Korrel. Signif.			1,000 0,000	0,929 0,000	0,831 0,003	0,738 0,015	0,565 0,089	0,398 0,255
$F_{S,F}$ 1,0-0,71	Korrel. Signif.				1,000 0,000	0,973 0,000	0,922 0,000	0,781 0,008	0,630 0,051
$F_{S,F}$ 0,71-0,63	Korrel. Signif.					1,000 0,000	0,985 0,000	0,893 0,001	0,777 0,008
$F_{S,F}$ 0,63-0,5	Korrel. Signif.						1,000 0,000	0,951 0,000	0,866 0,001
$F_{S,F}$ 0,5-0,4	Korrel. Signif.							1,000 0,000	0,975 0,000
$F_{S,F}$ 0,4-0,315	Korrel. Signif.								1,000 0,000

Tabelle A1-4: Bivariate Korrelation der Sphärizitäten  $F_{S,\ddot{A}}$ 

		$F_{S,\ddot{A}}$ 2,5-2,0	$F_{S,\ddot{A}}$ 2,0-1,6	$F_{S,\ddot{A}}$ 1,6-1,0	$F_{S,\ddot{A}}$ 1,0-0,71	$F_{S,\ddot{A}}$ 0,71-0,63	$F_{S,\ddot{A}}$ 0,63-0,5	$F_{S,\ddot{A}}$ 0,5-0,4	$F_{S,\ddot{A}}$ 0,4-0,315
$F_{S,\ddot{A}}$ 2,5-2	Korrel. Signif.	1,000 0,000	0,919 0,000	0,906 0,000	0,841 0,002	0,823 0,003	0,740 0,014	0,600 0,067	0,402 0,249
$F_{S,\ddot{A}}$ 2-1,6	Korrel. Signif.		1,000 0,000	0,934 0,000	0,860 0,001	0,811 0,004	0,703 0,023	0,539 0,108	0,360 0,308
$F_{S,\ddot{A}}$ 1,6-1	Korrel. Signif.			1,000 0,000	0,980 0,000	0,958 0,000	0,871 0,001	0,710 0,021	0,495 0,146
$F_{S,\ddot{A}}$ 1,0-0,71	Korrel. Signif.				1,000 0,000	0,983 0,000	0,900 0,000	0,735 0,015	0,504 0,138
$F_{S,\ddot{A}}$ 0,71-0,63	Korrel. Signif.					1,000 0,000	0,962 0,000	0,840 0,002	0,640 0,046
$F_{S,\ddot{A}}$ 0,63-0,5	Korrel. Signif.						1,000 0,000	0,949 0,000	0,812 0,004
$F_{S,\ddot{A}}$ 0,5-0,4	Korrel. Signif.							1,000 0,000	0,944 0,000
$F_{S,\ddot{A}}$ 0,4-0,315	Korrel. Signif.								1,000 0,000

Tabelle A1-5: Eingeschränkt kolineare Parameter  $F_{S,F,n}$ 

		$F_{S,F,1}$	$F_{S,F,2}$	$F_{S,F,3}$
$F_{S,F,1}$	Korrelation	1,000	0,795	0,429
	Signifikanz	0,000	0,006	0,216
$F_{S,F,2}$	Korrelation		1,000	0,838
	Signifikanz		0,000	0,002
$F_{S,F,3}$	Korrelation			1,000
	Signifikanz			0,000

Tabelle A1-6: Eingeschränkt kolineare Parameter  $F_{S,\ddot{A},n}$ 

		$F_{S,\ddot{A},1}$	$F_{S,\ddot{A},2}$	$F_{S,\ddot{A},3}$
$F_{S,\ddot{A},1}$	Korrelation	1,000	0,874	0,538
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,001	0,108
$F_{S,\ddot{A},2}$	Korrelation		1,000	0,768
	Signifikanz (2-seitig)		0,000	0,010
$F_{S,\ddot{A},3}$	Korrelation			1,000
	Signifikanz (2-seitig)			0,000

Tabelle A1-7: Varianzanalyse zur Klärung des Einflusses der Gesteinsart auf die Sphärizitäten

		Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
$F_{S,F,1}$	Zwischen den Gesteinsarten	1,0E-05	1	1,0E-05	0,014	0,91
	Innerhalb der Gesteinsarten	5,88E-03	8	7,35E-04		
	Gesamt	5,89E-03	9			
$F_{S,F,2}$	Zwischen den Gesteinsarten	4,9E-04	1	4,9E-04	3,267	0,108
	Innerhalb der Gesteinsarten	1,2E-03	8	1,5E-04		
	Gesamt	1,69E-03	9			
$F_{S,F,3}$	Zwischen den Gesteinsarten	3,6E-04	1	3,6E-04	12,0	0,009
	Innerhalb der Gesteinsarten	2,4E-04	8	3,0E-05		
	Gesamt	6,0E-04	9			
$F_{S,\ddot{A},1}$	Zwischen den Gesteinsarten	7,840E-05	1	7,840E-05	0,149	0,710
	Innerhalb der Gesteinsarten	4,218E-03	8	5,273E-04		
	Gesamt	4,297E-03	9			
$F_{S,\ddot{A},2}$	Zwischen den Gesteinsarten	2,240E-04	1	2,240E-04	2,091	0,186
	Innerhalb der Gesteinsarten	8,571E-04	8	1,071E-04		
	Gesamt	1,081E-03	9			
$F_{S,\ddot{A},3}$	Zwischen den Gesteinsarten	3,844E-04	1	3,844E-04	12,35 0	0,008
	Innerhalb der Gesteinsarten	2,490E-04	8	3,112E-05		
	Gesamt	6,334E-04	9			



## Kubizitäten der Brechsande

Tabelle A2-1: Kubizitäten  $F_{Kub,F}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

Kornklasse	$F_{Kub,F}$									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,484	1,545	1,588	1,562	1,729	1,464	1,505	1,526	1,613	1,792
2,000-1,600	1,467	1,486	1,529	1,531	1,676	1,464	1,476	1,507	1,574	1,722
1,600-1,000	1,454	1,473	1,51	1,454	1,584	1,439	1,474	1,485	1,542	1,653
1,000-0,710	1,429	1,438	1,485	1,469	1,524	1,433	1,449	1,441	1,45	1,593
0,710-0,630	1,405	1,411	1,463	1,464	1,479	1,404	1,433	1,42	1,418	1,534
0,630-0,500	1,394	1,395	1,446	1,458	1,465	1,395	1,418	1,422	1,404	1,478
0,500-0,400	1,365	1,362	1,409	1,43	1,427	1,353	1,383	1,394	1,381	1,395
0,400-0,315	1,344	1,338	1,379	1,396	1,383	1,332	1,352	1,371	1,363	1,332

Tabelle A2-2: Kubizitäten  $F_{Kub,\ddot{A}}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

Kornklasse	$F_{Kub,\ddot{A}}$									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
2,500-2,000	1,346	1,347	1,414	1,431	1,565	1,347	1,366	1,292	1,352	1,552
2,000-1,600	1,365	1,375	1,428	1,415	1,496	1,344	1,327	1,303	1,438	1,502
1,600-1,000	1,37	1,373	1,408	1,4	1,476	1,359	1,351	1,326	1,371	1,487
1,000-0,710	1,384	1,372	1,377	1,395	1,429	1,358	1,358	1,340	1,339	1,459
0,710-0,630	1,382	1,364	1,37	1,388	1,41	1,354	1,341	1,352	1,333	1,430
0,630-0,500	1,363	1,357	1,36	1,383	1,39	1,340	1,337	1,351	1,324	1,409
0,500-0,400	1,35	1,34	1,351	1,367	1,362	1,332	1,325	1,352	1,312	1,382
0,400-0,315	1,352	1,344	1,348	1,368	1,355	1,327	1,326	1,364	1,315	1,359

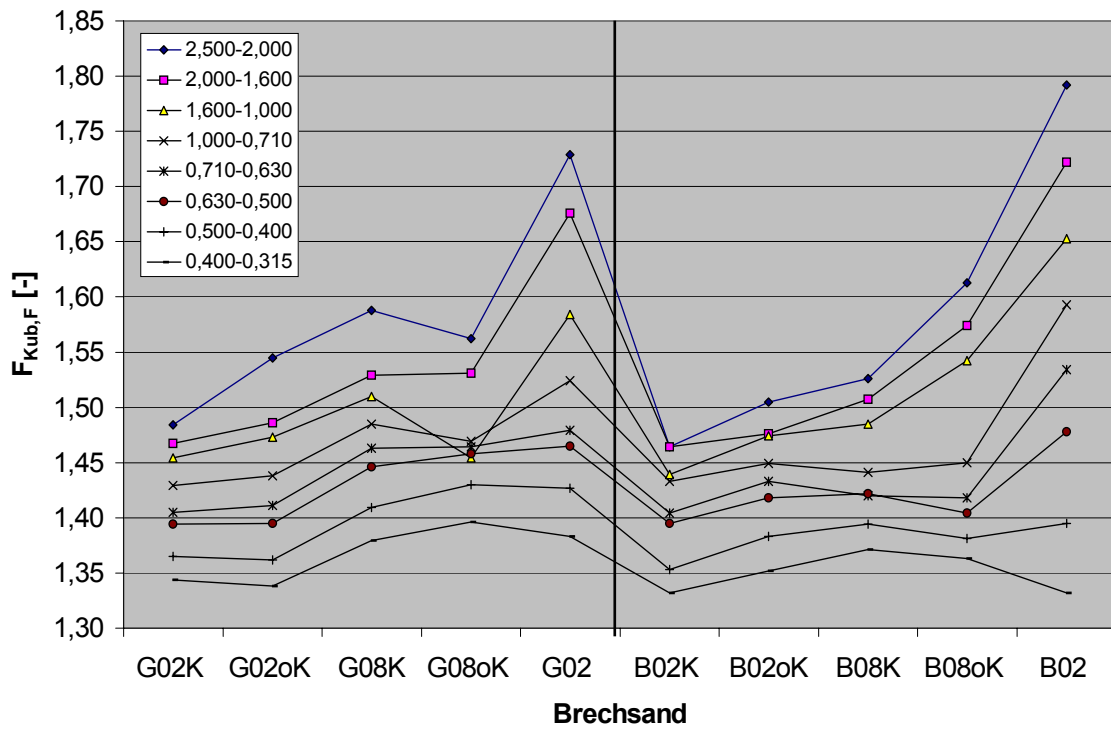


Abbildung A2-1: Kubizitäten  $F_{Kub,F}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

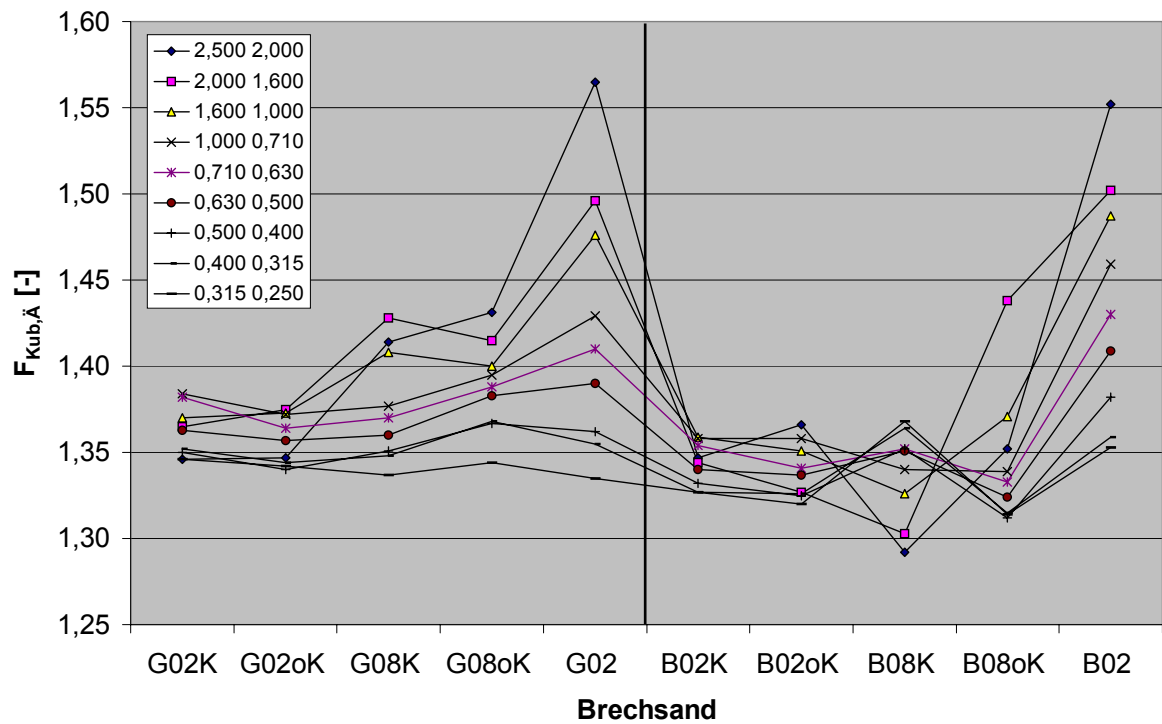


Abbildung A2-2: Kubizitäten  $F_{Kub,Ä}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

TabelleA2-3: Bivariate Korrelation der Kubizitäten  $F_{Kub,F}$ 

		$F_{Kub,F}$ 2,5-2,0	$F_{Kub,F}$ 2,0-1,6	$F_{Kub,F}$ 1,6-1,0	$F_{Kub,F}$ 1,0-0,71	$F_{Kub,F}$ 0,71-0,63	$F_{Kub,F}$ 0,63-0,5	$F_{Kub,F}$ 0,5-0,4	$F_{Kub,F}$ 0,4-0,315
$F_{Kub,F}$ 2,5-2,0	Korrel. Signif.	1,000 0,000	0,988 0,000	0,964 0,000	0,935 0,000	0,877 0,001	0,798 0,006	0,543 0,104	0,122 0,736
$F_{Kub,F}$ 2,0-1,6	Korrel. Signif.		1,000 0,000	0,959 0,000	0,930 0,000	0,865 0,001	0,789 0,006	0,542 0,105	0,123 0,743
$F_{Kub,F}$ 1,6-1,0	Korrel. Signif.			1,000 0,000	0,907 0,000	0,813 0,004	0,689 0,028	0,380 0,278	-0,039 0,915
$F_{Kub,F}$ 1,0-0,71	Korrel. Signif.				1,000 0,000	0,970 0,000	0,873 0,001	0,518 0,125	0,0230 0,95
$F_{Kub,F}$ 0,71-0,63	Korrel. Signif.					1,000 0,000	0,948 0,000	0,655 0,040	0,184 0,611
$F_{Kub,F}$ 0,63-0,5	Korrel. Signif.						1,000 0,000	0,847 0,002	0,459 0,182
$F_{Kub,F}$ 0,5-0,4	Korrel. Signif.							1,000 0,000	0,855 0,002
$F_{Kub,F}$ 0,4-0,315	Korrel. Signif.								1,000 0,000

Tabelle A2-4: Bivariate Korrelation der Kubizitäten  $F_{Kub,\ddot{A}}$ 

		$F_{Kub,\ddot{A}}$ 2,5-2,0	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 2,0-1,6	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 1,6-1,0	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 1,0-0,71	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,71-0,63	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,63-0,5	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,5-0,4	$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,4-0,315
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 2,5-2,0	Korrel. Signif.	1,000 0,000	0,884 0,001	0,978 0,000	0,918 0,000	0,853 0,002	0,821 0,004	0,665 0,036	0,356 0,313
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 2,0-1,6	Korrel. Signif.		1,000 0,000	0,932 0,000	0,772 0,009	0,710 0,021	0,656 0,039	0,481 0,159	0,185 0,608
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 1,6-1,0	Korrel. Signif.			1,000 0,000	0,933 0,000	0,880 0,001	0,835 0,003	0,680 0,030	0,360 0,307
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 1,0-0,71	Korrel. Signif.				1,000 0,000	0,973 0,000	0,944 0,000	0,825 0,003	0,531 0,114
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,71-0,63	Korrel. Signif.					1,000 0,000	0,981 0,000	0,911 0,000	0,683 0,030
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,63-0,5	Korrel. Signif.						1,000 0,000	0,957 0,000	0,777 0,008
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,5-0,4	Korrel. Signif.							1,000 0,000	0,897 0,000
$F_{Kub,\ddot{A}}$ 0,4-0,315	Korrel. Signif.								1,000 0,000

Tabelle A2-5: Eingeschränkt kolineare Parameter  $F_{Kub,F,n}$ 

		$F_{Kub,F,1}$	$F_{Kub,F,2}$	$F_{Kub,F,3}$	$F_{Kub,F,4}$
$F_{Kub,F,1}$	Korrelation	1,000	0,862	0,512	0,073
	Signifikanz	0,000	0,001	0,130	0,842
$F_{Kub,F,2}$	Korrelation		1,000	0,748	0,307
	Signifikanz		0,000	0,013	0,388
$F_{Kub,F,3}$	Korrelation			1,000	0,855
	Signifikanz			0,000	0,002
$F_{Kub,F,4}$	Korrelation				1,000
	Signifikanz				0,000

Tabelle A2-5: Eingeschränkt kolineare Parameter  $F_{Kub,Ä,n}$ 

		$F_{Kub,Ä,1}$	$F_{Kub,Ä,2}$	$F_{Kub,Ä,3}$	$F_{Kub,Ä,4}$
$F_{Kub,Ä,1}$	Korrelation	1,000	0,941	0,881	0,537
	Signifikanz	0,000	0,000	0,001	0,110
$F_{Kub,Ä,2}$	Korrelation		1,000	0,817	0,446
	Signifikanz		0,000	0,004	0,197
$F_{Kub,Ä,3}$	Korrelation			1,000	0,808
	Signifikanz			0,000	0,005
$F_{Kub,Ä,4}$	Korrelation				1,000
	Signifikanz				0,000

**Tabelle A2-7: Varianzanalyse zur Klärung des Einflusses der Gesteinsart auf die Kubizitäten**

		Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
<b>F<sub>Kub,F,1</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	1,6E-04	1	1,6E-04	0,024	0,881
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	5,38E-02	8	6,66E-03		
	<b>Gesamt</b>	5,34E-02	9			
<b>F<sub>Kub,F,2</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	1,0E-05	1	1,0E-05	0,007	0,938
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	1,22E-02	8	1,53E-03		
	<b>Gesamt</b>	1,23E-02	9			
<b>F<sub>Kub,F,3</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	1,0E-03	1	1,0E-03	1,379	0,274
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	5,8E-03	8	7,25E-04		
	<b>Gesamt</b>	6,8E-03	9			
<b>F<sub>Kub,F,4</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	1,0E-03	1	1,0E-03	1,923	0,203
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	4,16E-03	8	5,2E-04		
	<b>Gesamt</b>	5,16E-03	9			
<b>F<sub>Kub,Ä,1</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	3,764E-03	1	3,764E-03	0,422	0,534
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	7,137E-02	8	8,921E-03		
	<b>Gesamt</b>	7,513E-02	9			
<b>F<sub>Kub,Ä,2</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	2,220E-03	1	2,220E-03	0,603	0,460
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	2,944E-02	8	3,680E-03		
	<b>Gesamt</b>	3,166E-02	9			
<b>F<sub>Kub,Ä,3</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	9,933E-04	1	9,933E-04	1,015	0,343
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	7,827E-03	8	9,784E-04		
	<b>Gesamt</b>	8,821E-03	9			
<b>F<sub>Kub,Ä,4</sub></b>	<b>Zwischen den Gesteinsarten</b>	5,112E-04	1	5,112E-04	1,543	0,249
	<b>Innerhalb der Gesteinsarten</b>	2,651E-03	8	3,313E-04		
	<b>Gesamt</b>	3,162E-03	9			

**Tabelle A3-1: Konkavitäten  $F_{Kon,F}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande**

Kornklasse	$F_{Kon,F}$									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
<b>2,500-2,000</b>	1,559	1,624	1,671	1,652	1,842	1,538	1,571	1,595	1,699	1,914
<b>2,000-1,600</b>	1,535	1,561	1,606	1,616	1,782	1,540	1,544	1,579	1,654	1,836
<b>1,600-1,000</b>	1,524	1,548	1,581	1,522	1,682	1,504	1,544	1,550	1,619	1,754
<b>1,000-0,710</b>	1,494	1,509	1,553	1,537	1,612	1,495	1,510	1,501	1,513	1,773
<b>0,710-0,630</b>	1,464	1,479	1,527	1,531	1,557	1,461	1,490	1,475	1,474	1,610
<b>0,630-0,500</b>	1,453	1,464	1,510	1,527	1,541	1,452	1,474	1,475	1,459	1,543
<b>0,500-0,400</b>	1,418	1,415	1,466	1,494	1,489	1,398	1,431	1,443	1,429	1,444
<b>0,400-0,315</b>	1,391	1,388	1,425	1,449	1,438	1,374	1,392	1,412	1,408	1,370

**Tabelle A3-2: Konkavitäten  $F_{Kon,Ä}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande**

Kornklasse	$F_{Kon,Ä}$									
	G02K	G02oK	G08K	G08oK	G02	B02K	B02oK	B08K	B08oK	B02
<b>2,500-2,000</b>	1,407	1,396	1,492	1,505	1,661	1,415	1,430	1,416	1,403	1,646
<b>2,000-1,600</b>	1,427	1,435	1,510	1,482	1,588	1,400	1,389	1,414	1,506	1,589
<b>1,600-1,000</b>	1,434	1,435	1,474	1,463	1,557	1,420	1,413	1,443	1,429	1,566
<b>1,000-0,710</b>	1,447	1,432	1,433	1,454	1,502	1,416	1,414	1,399	1,391	1,529
<b>0,710-0,630</b>	1,442	1,420	1,427	1,446	1,476	1,408	1,394	1,383	1,384	1,493
<b>0,630-0,500</b>	1,417	1,413	1,414	1,439	1,451	1,391	1,385	1,381	1,366	1,464
<b>0,500-0,400</b>	1,401	1,387	1,402	1,416	1,417	1,379	1,369	1,359	1,349	1,428
<b>0,400-0,315</b>	1,391	1,383	1,391	1,413	1,399	1,366	1,361	1,360	1,353	1,395

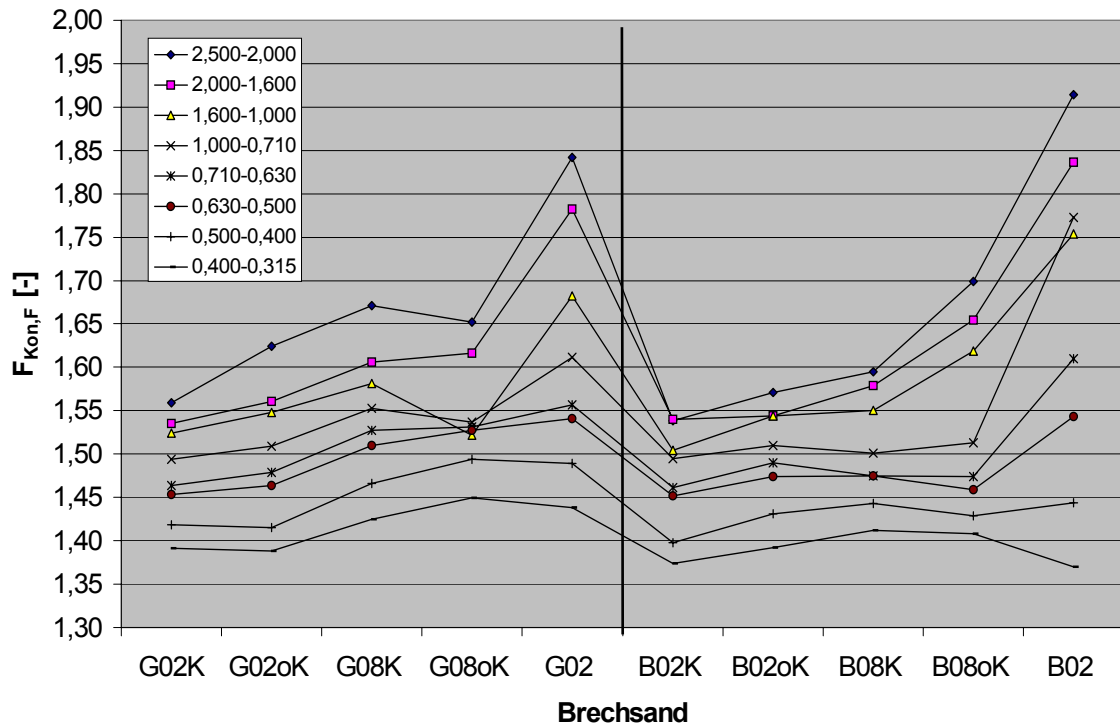


Bild A3-1: Konkavitäten  $F_{Kon,F}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

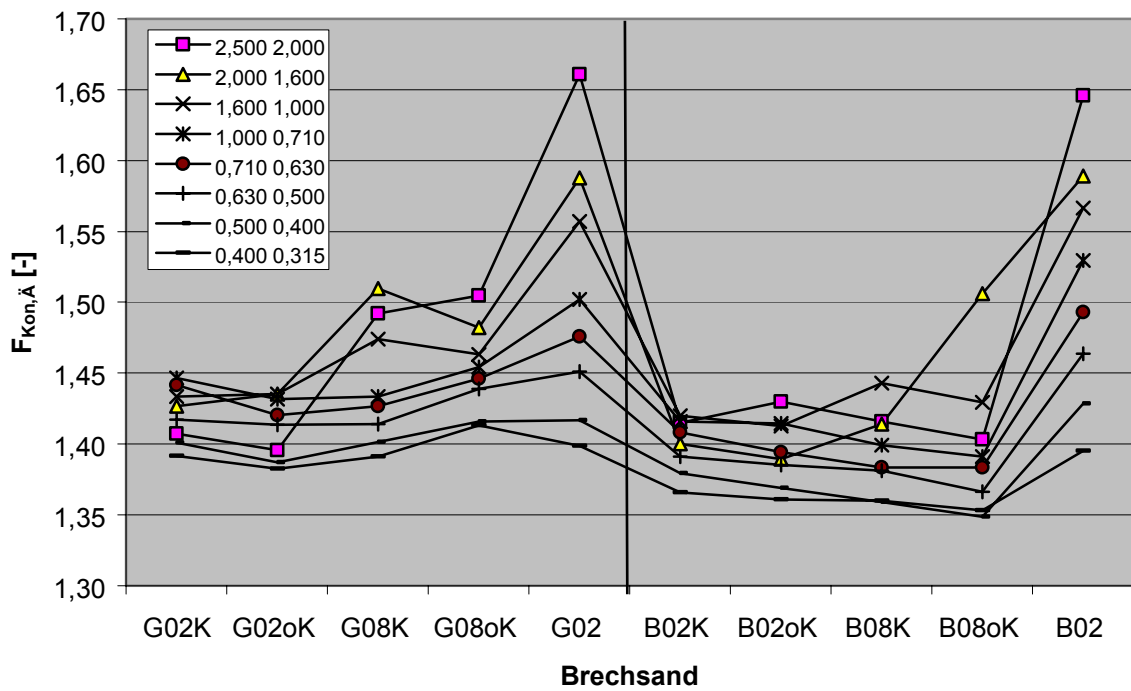


Bild A3-2: Konkavitäten  $F_{Kon,Ä}$  der Grauwacke- und Basaltbrechsande

Tabelle A3-3: Bivariate Korrelation der Konkavitäten  $F_{Kon,F}$ 

		$F_{Kon,F}$ 2,5-2,0	$F_{Kon,F}$ 2,0-1,6	$F_{Kon,F}$ 1,6-1,0	$F_{Kon,F}$ 1,0-0,71	$F_{Kon,F}$ 0,71-0,63	$F_{Kon,F}$ 0,63-0,5	$F_{Kon,F}$ 0,5-0,4	$F_{Kon,F}$ 0,4-0,315
$F_{Kon,F}$ 2,5-2	Korrel. Signif.	1,000	0,989 0,000	0,964 0,000	0,909 0,000	0,899 0,000	0,813 0,004	0,512 0,130	0,124 0,733
$F_{Kon,F}$ 2,0-1,6	Korrel. Signif.		1,000 0,000	0,958 0,000	0,906 0,000	0,884 0,001	0,804 0,005	0,502 0,139	0,114 0,754
$F_{Kon,F}$ 1,6-1,0	Korrel. Signif.			1,000 0,000	0,901 0,000	0,821 0,004	0,678 0,031	0,331 0,350	-0,061 0,866
$F_{Kon,F}$ 1,0-0,71	Korrel. Signif.				1,000 0,000	0,938 0,000	0,783 0,007	0,345 0,329	-0,147 0,685
$F_{Kon,F}$ 0,71-0,63	Korrel. Signif.					1,000 0,000	0,944 0,000	0,627 0,053	0,164 0,651
$F_{Kon,F}$ 0,63-0,5	Korrel. Signif.						1,000 0,000	0,836 0,003	0,458 0,183
$F_{Kon,F}$ 0,5-0,4	Korrel. Signif.							1,000 0,000	0,864 0,001
$F_{Kon,F}$ 0,4-0,315	Korrel. Signif.								1,000 0,000

Tabelle A3-4: Bivariate Korrelation der Konkavitäten  $F_{Kon,Ä}$ 

		$F_{Kon,Ä}$ 2,5-2,0	$F_{Kon,Ä}$ 2,0-1,6	$F_{Kon,Ä}$ 1,6-1,0	$F_{Kon,Ä}$ 1,0-0,71	$F_{Kon,Ä}$ 0,71-0,63	$F_{Kon,Ä}$ 0,63-0,5	$F_{Kon,Ä}$ 0,5-0,4	$F_{Kon,Ä}$ 0,4-0,315
$F_{Kon,Ä}$ 2,5-2	Korrel. Signif.	1,000 0,000	0,869 0,001	0,969 0,000	0,904 0,000	0,855 0,002	0,837 0,003	0,770 0,009	0,615 0,059
$F_{Kon,Ä}$ 2,0-1,6	Korrel. Signif.		1,000 0,000	0,909 0,000	0,759 0,011	0,739 0,015	0,692 0,026	0,617 0,058	0,523 0,121
$F_{Kon,Ä}$ 1,6-1,0	Korrel. Signif.			1,000 0,000	0,910 0,000	0,863 0,001	0,841 0,002	0,755 0,012	0,598 0,068
$F_{Kon,Ä}$ 1,0-0,71	Korrel. Signif.				1,000 0,000	0,982 0,000	0,958 0,000	0,907 0,000	0,744 0,014
$F_{Kon,Ä}$ 0,71-0,63	Korrel. Signif.					1,000 0,000	0,979 0,000	0,956 0,000	0,834 0,003
$F_{Kon,Ä}$ 0,63-0,5	Korrel. Signif.						1,000 0,000	0,976 0,000	0,895 0,000
$F_{Kon,Ä}$ 0,5-0,4	Korrel. Signif.							1,000 0,000	0,933 0,000
$F_{Kon,Ä}$ 0,4-0,315	Korrel. Signif.								1,000 0,000



Tabelle A3-5: Eingeschränkt kolineare Parameter  $F_{Kon,F,n}$ 

		$F_{Kon,F,1}$	$F_{Kon,F,2}$	$F_{Kon,F,3}$
$F_{Kon,F,1}$	Korrelation	1,000	0,871	0,263
	Signifikanz	0,000	0,001	0,462
$F_{Kon,F,2}$	Korrelation		1,000	0,549
	Signifikanz		0,000	0,101
$F_{Kon,F,3}$	Korrelation			1,000
	Signifikanz			0,000

Tabelle A3-6: Eingeschränkt kolineare Parameter  $F_{Kon,Ä,n}$ 

		$F_{Kon,Ä,1}$	$F_{Kon,Ä,2}$	$F_{Kon,Ä,3}$	$F_{Kon,Ä,4}$
$F_{Kon,Ä,1}$	Korrelation	1,000	0,933	0,863	0,615
	Signifikanz	0,000	0,000	0,001	0,059
$F_{Kon,Ä,2}$	Korrelation		1,000	0,802	0,586
	Signifikanz		0,000	0,005	0,087
$F_{Kon,Ä,3}$	Korrelation			1,000	0,851
	Signifikanz			0,000	0,002
$F_{Kon,Ä,4}$	Korrelation				1,000
	Signifikanz				0,000

Tabelle A3-7: Varianzanalyse zur Klärung des Einflusses der Gesteinsart auf die Konkavitäten

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
$F_{Kon,F,1}$	Zwischen den Gesteinsarten	3,6E-04	1	3,6E-04	0,034	0,857
	Innerhalb den Gesteinsarten	8,35E-02	8	1,04E-02		
	Gesamt	8,38E-02	9			
$F_{Kon,F,2}$	Zwischen den Gesteinsarten	3,6E-04	1	3,6E-04	0,184	0,679
	Innerhalb den Gesteinsarten	1,56E-02	8	1,95E-03		
	Gesamt	1,6E-02	9			
$F_{Kon,F,3}$	Zwischen den Gesteinsarten	1,44E-03	1	1,44E-03	2,133	0,182
	Innerhalb den Gesteinsarten	5,4E-03	8	6,75E-04		
	Gesamt	6,8E-03	9			
$F_{Kon,Ä,1}$	Zwischen den Gesteinsarten	2,273E-03	1	2,273E-03	0,207	0,661
	Innerhalb den Gesteinsarten	8,771E-02	8	1,096E-02		
	Gesamt	8,998E-02	9			
$F_{Kon,Ä,2}$	Zwischen den Gesteinsarten	1,391E-03	1	1,391E-03	0,327	0,583
	Innerhalb den Gesteinsarten	3,401E-02	8	4,251E-03		
	Gesamt	3,540E-02	9			
$F_{Kon,Ä,3}$	Zwischen den Gesteinsarten	1,892E-03	1	1,892E-03	1,724	0,226
	Innerhalb den Gesteinsarten	8,777E-03	8	1,097E-03		
	Gesamt	1,067E-02	9			
$F_{Kon,Ä,4}$	Zwischen den Gesteinsarten	2,022E-03	1	2,022E-03	10,174	0,013
	Innerhalb den Gesteinsarten	1,590E-03	8	1,988E-04		
	Gesamt	3,612E-03	9			

## Ergebnisse der statistischen Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Tabelle A4: Einfaktorielle Varianzanalyse der Asphalteeigenschaften  
Faktor: Gesteinsart

Eigen- schaft		Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifi- kanz
<b>H<sub>M,bit</sub> AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	3,518	1	3,581	9,386	0,015
	Innerhalb der Gesteinsarten	2,999	8	0,375		
	Gesamt	6,516	9			
<b>ε<sub>10</sub> AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	0,081	1	0,081	0,007	0,935
	Innerhalb der Gesteinsarten	91,148	8	11,394		
	Gesamt	91,229	9			
<b>ε<sub>w</sub>* AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	0,01	1	0,01	0,237	0,64
	Innerhalb der Gesteinsarten	0,34	8	0,042		
	Gesamt	0,35	9			
<b>D-Wert AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	8,836	1	8,836	2,52	0,151
	Innerhalb der Gesteinsarten	28,048	8	3,506		
	Gesamt	36,884	9			
<b>SZA AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	302,055	1	302,055	6,291	0,036
	Innerhalb der Gesteinsarten	384,134	8	48,017		
	Gesamt	686,189	9			
<b>Stabilität AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	0,07	1	0,07	0,076	0,79
	Innerhalb der Gesteinsarten	7,360	8	0,92		
	Gesamt	7,430	9			
<b>Fließwert AB</b>	Zwischen den Gesteinsarten	34,225	1	34,225	2,489	0,153
	Innerhalb der Gesteinsarten	110,00	8	13,75		
	Gesamt	144,225	9			
<b>H<sub>M,bit</sub> SMA</b>	Zwischen den Gesteinsarten	1,766	1	1,766	17,61	0,003
	Innerhalb der Gesteinsarten	0,802	8	0,1		
	Gesamt	2,569	9			
<b>ε<sub>4</sub> SMA</b>	Zwischen den Gesteinsarten	2,116	1	2,116	0,598	0,462
	Innerhalb der Gesteinsarten	28,308	8	3,539		
	Gesamt	30,424	9			
<b>ε<sub>w</sub>* SMA</b>	Zwischen den Gesteinsarten	0,048	1	0,048	0,281	0,610
	Innerhalb der Gesteinsarten	1,358	8	0,17		
	Gesamt	1,406	9			
<b>D-Wert SMA</b>	Zwischen den Gesteinsarten	0,01	1	0,01	0,077	0,789
	Innerhalb der Gesteinsarten	10,424	8	1,303		
	Gesamt	10,524	9			
<b>SZA SMA</b>	Zwischen den Gesteinsarten	9,632	1	9,632	0,517	0,493
	Innerhalb der Gesteinsarten	149,175	8	18,647		
	Gesamt	158,808	9			







Tabelle A5-4: Standardisierte Regressionskoeffizienten bei Splittmastixasphalt 0/11 S;  $\delta = d_A$

SMA 0/11 S	Methode	Standardisierte Koeffizienten und Signifikanz														
		F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,2</sub>	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	F <sub>Kub,Ä,2</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	F <sub>Kon,Ä,3</sub>	RRSBn <sub>Ä</sub>	D25/D75 <sub>Ä</sub>	FG <sub>Ä</sub>	A <sub>KM</sub>	FZ	Gestein		
Abh. Var.	pho, Äqui				-0,772 0,001	1,098 <1°/00										0,745 <1°/00
	mechanisch											0,585 0,004				
	kombiniert				-0,772 0,001	1,098 <1°/00										0,745 <1°/00
ε <sub>4</sub>	pho, Äqui	0,724 0,018														
	mechanisch															
	kombiniert	0,724 0,018														
ε <sub>w</sub> *	pho, Äqui	0,678 0,031														
	mechanisch															
	kombiniert	0,678 0,031														
D-Wert	pho, Äqui	0,964 <1°/00														
	mechanisch											0,889 0,001				
	kombiniert	0,964 <1°/00														
SZA	pho, Äqui	0,900 <1°/00														0,368 0,039
	mechanisch												0,930 <1°/00			
	kombiniert													0,930 <1°/00		

Unter den verwendeten Kriterien des Regressionsalgorithmus nicht durchführbar

Unter den verwendeten Kriterien des Regressionsalgorithmus nicht durchführbar

**Tabelle A5-5: Ergebnisse der Regressionsanalyse bei Asphaltbeton 0/11 S;  $\delta = df$**

Abh. Var.	Anova		Sig T	Konfidenzintervall bei 95 %		Partielle Korrelationsanalyse		
	r			min	max	Var	Var <sub>Kontroll</sub>	r <sub>partiell</sub>
H <sub>M,bit</sub>	0,956	pho, Feret	<1°/00	F <sub>S,F,2</sub> : 25,87	64,36	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1, G</sub>	0,63
	0,934	mechanisch	0,001	A <sub>KM</sub> : 0,972	3,363			
	0,956	kombiniert	<1°/00	F <sub>S,F,2</sub> : 25,87	64,36	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2, G</sub>	0,34
ε <sub>10</sub>	0,976	pho, Feret	<1°/00	F <sub>Kub,F,1</sub> : 31,2 F <sub>Kub,F,2</sub> : 0,8	47,2 53,2	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,91
	0,94	mechanisch	<1°/00	A <sub>KM</sub> : 9,2	16,9			
	0,976	kombiniert	<1°/00	F <sub>Kub,F,1</sub> : 31,2 F <sub>Kub,F,2</sub> : 0,8	47,2 53,2	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,31
ε <sub>w</sub> *	0,836	pho, Feret	0,003	F <sub>Kub,F,1</sub> : 10,0	32,8	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,80
	0,789	mechanisch	0,007	A <sub>KM</sub> : 2,5	11,1			
	0,836	kombiniert	0,003	F <sub>Kub,F,1</sub> : 10,0	32,8	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,27
D-Wert	0,827	pho, Feret	0,003	F <sub>S,F,2</sub> : 54,4	189,9	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,79
	0,732	mechanisch	0,068	A <sub>KM</sub> : -0,6	10,3			
	0,827	kombiniert	0,003	F <sub>S,F,2</sub> : 54,4	189,9	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,28
SZA	0,967	pho, Feret	<1°/00	F <sub>S,F,2</sub> : 455,0 D25/75 <sub>F</sub> : 13,3	747,5 119,6	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub>	0,79
	0,958	mechanisch	<1°/00	A <sub>KM</sub> : 16,8	36,5			
	0,967	kombiniert	<1°/00	F <sub>S,F,2</sub> : 455,0 D25/75 <sub>F</sub> : 13,3	747,5 119,6	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub>	0,28
Stabilität	0,896	pho, Feret	0,003	F <sub>Kon,F,1</sub> : 24,5 F <sub>Kub,F,1</sub> : -144,7	122,1 -22,5	F <sub>Kon,F,1</sub>	F <sub>S,F,1</sub>	0,8
	0,683	mechanisch	0,029	A <sub>KM</sub> : 0,35	5,1			
	0,896	kombiniert	0,003	F <sub>Kon,F,1</sub> : 24,5 F <sub>Kub,F,1</sub> : -144,7	122,1 -22,5	F <sub>S,F,1</sub>	F <sub>Kon,F,1</sub>	0,46

**Tabelle A5-6: Ergebnisse der Regressionsanalyse bei Splittmastixasphalt 0/11 S;  $\delta = df$**

SMA 0/11 S Abh. Var.	Anova		Konfidenzintervall bei 95 %		Var	Partielle Korrelation		
	r	Sig T	min	max		Var <sub>kontroll</sub>	r <sub>partiell</sub>	
H <sub>M,bit</sub>	pho, Feret	0,954	<1°/oo	F <sub>S,F,2</sub> : 9,531	34,204	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub> , G 0,71	
	mechanisch	0,920	0,001	A <sub>KM</sub> : 0,118	1,765	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub> , G 0,23	
	kombiniert	0,954	<1°/oo	F <sub>S,F,2</sub> : 9,531	34,204	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub> 0,66	
ε <sub>4</sub>	pho, Feret	0,752	0,012	F <sub>S,F,2</sub> : 28,9	173,0	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>S,F,2</sub> 0,09	
	mechanisch	Unter den verwendeten Kriterien des Regressionsalgorithmus nicht durchführbar						
	kombiniert	0,752	0,012	F <sub>S,F,2</sub> : 28,9	173,0	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,2</sub> 0,33	
ε <sub>w</sub> *	pho, Feret	0,702	0,024	F <sub>S,F,1</sub> : 3,518	37,0	F <sub>Kub,F,3</sub>	F <sub>S,F,2</sub> 0,07	
	mechanisch	Unter den verwendeten Kriterien des Regressionsalgorithmus nicht durchführbar						
	kombiniert	0,702	0,024	F <sub>S,F,2</sub> : 3,518	37,0	F <sub>S,F,2</sub>	F <sub>Kub,F,3</sub> 0,61	
D-Wert	pho, Feret	0,938	<1°/oo	F <sub>S,F,1</sub> : 27,7	56,6	F <sub>S,F,1</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub> 0,09	
	mechanisch	0,889	0,001	A <sub>KM</sub> : 2,4	5,9	F <sub>S,F,1</sub>	F <sub>S,F,1</sub> 0,38	
	kombiniert	0,938	<1°/oo	F <sub>S,F,1</sub> : 27,7	56,6	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,1</sub> 0,23	
SZA	pho, Feret	0,927	<1°/oo	F <sub>S,F,1</sub> : 101,8	202,5	F <sub>S,F,1</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub> 0,38	
	mechanisch	0,930	1°/oo	A <sub>KM</sub> : 11,5	22,5	F <sub>S,F,1</sub>	F <sub>Kub,F,1</sub> 0,23	
	kombiniert	0,930	1°/oo	A <sub>KM</sub> : 11,5	22,5	F <sub>Kub,F,1</sub>	F <sub>S,F,1</sub> 0,23	



Tabelle A5-7: Ergebnisse der Regressionsanalyse bei Asphaltbeton 0/11 S;  $\delta = d_{\Delta}$ 

AB 0/11 S Abh. Var.	Anova		Konfidenzintervall bei 95 %		max	Partielle Korrelation	
	r	Sig T	min	Var		Var <sub>k</sub>	r <sub>p</sub>
H <sub>M,bit</sub>	0,939	0,001	F <sub>S,Ä,1</sub> : 10,9	F <sub>S,Ä,1</sub>	35,1	F <sub>Kub,Ä,1, M</sub>	0,58
	0,952	0,002	D25/75 <sub>Ä</sub> : -18,2 FZ: 5,3 F <sub>Kon,Ä,1</sub> : -29,1		-7,7 18,7 -2,4		
	0,952	0,002	D25/75 <sub>Ä</sub> : -18,2 FZ: 5,3 F <sub>Kon,Ä,2</sub> : -29,1		-7,7 18,7 -2,4	F <sub>S,Ä,1, M</sub>	0,17
ε <sub>10</sub>	0,992	<1 °/oo	F <sub>Kon,Ä,2</sub> : 47,7 F <sub>Kon,Ä,3</sub> : -61,2 RRSB: -7,6	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	63,5 -7,2 -4,2	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,52
	0,94	<1 °/oo	A <sub>KM</sub> : 9,2		16,9		
	0,992	<1 °/oo	F <sub>Kon,Ä,1</sub> : 47,7 F <sub>Kon,Ä,2</sub> : -61,2 RRSB: -7,6	F <sub>S,Ä,1</sub>	63,5 -7,2 -0,42	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	0,39
ε <sub>w</sub> *	0,914	0,002	F <sub>Kon,Ä,1</sub> : 11,4 FG: 0,6	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	34,4 5,1	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,64
	0,789	0,007	A <sub>KM</sub> : 2,5		11,1		
	0,914	0,002	F <sub>Kon,Ä,1</sub> : 11,4 FG: 0,6	F <sub>S,Ä,1</sub>	34,4 5,1	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	0,40
D-Wert	0,757	0,011	F <sub>Kub,Ä,1</sub> : 5,0	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	28,6	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,38
	0,732	0,068	A <sub>KM</sub> : -0,6		10,3		
	0,757	0,011	F <sub>Kub,Ä,1</sub> : 5,0	F <sub>S,Ä,1</sub>	28,6	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	0,04
SZA	0,89	0,001	F <sub>S,Ä,2</sub> : 416,4	F <sub>S,Ä,2</sub>	1005,1	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	0,67
	0,958	<1 °/oo	A <sub>KM</sub> : 16,8		36,5		
	0,89	0,001	F <sub>S,Ä,2</sub> : 416,4	F <sub>Kub,Ä,2</sub>	1005,1	F <sub>S,Ä,2</sub>	0,23
Stabilität	0,73	0,017	F <sub>Kub,Ä,2</sub> : 5,0	F <sub>Kub,Ä,3</sub>	37,6	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	0,42
	0,683	0,029	A <sub>KM</sub> : 0,35		5,1		
	0,73	0,017	F <sub>Kub,Ä,2</sub> : 5,0	F <sub>Kon,Ä,2</sub>	37,6	F <sub>Kub,Ä,3</sub>	0,15

**Tabelle A5-8: Ergebnisse der Regressionsanalyse bei Splittmastixasphalt 0/11 S;  $\delta = d_4$**

SMA 0/11 S Abh. Var.	Anova			Konfidenzintervall bei 95 %		Var	Partielle Korrelation		
	r	Sig T	min	max	Var <sub>Kontroll</sub>		r <sub>partiell</sub>		
H <sub>M,bit</sub>	pho. Äqui	0,991	<1°/oo	F <sub>Kub,Ä,2</sub> : -18,5 F <sub>Kon,Ä,1</sub> : 4,3	-7,9 7,4	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kub,Ä,2</sub> , F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,43	
	mechanisch	0,920	0,001	A <sub>KM</sub> : 0,118	1,765	F <sub>Kub,Ä,2</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,48	
	kombiniert	0,991	<1°/oo	F <sub>Kub,Ä,2</sub> : -18,5 F <sub>Kon,Ä,1</sub> : 4,3	-7,9 7,4	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,53	
	pho. Äqui	0,724	0,018	F <sub>S,Ä,1</sub> : 13,6	108,2	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,35	
ε <sub>4</sub>	mechanisch	Unter den verwendeten Kriterien des Regressionsalgorithmus nicht durchführbar					F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,41
	kombiniert	0,724	0,018	F <sub>S,Ä,1</sub> : 13,6	108,2	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,23	
	pho. Äqui	0,678	0,062	F <sub>S,Ä,1</sub> : 1,4	23,1	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,85	
D-Wert	mechanisch	Unter den verwendeten Kriterien des Regressionsalgorithmus nicht durchführbar					F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,56
	kombiniert	0,881	0,005	F <sub>S,Ä,1</sub> : 8,64 FZ: -10,8	25,6 -1,5	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,38	
	pho. Äqui	0,964	<1°/oo	F <sub>S,Ä,1</sub> : 37,0	58,4	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,23	
	mechanisch	0,889	0,001	A <sub>KM</sub> : 2,4	5,9	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	0,23	
SZA	kombiniert	0,964	<1°/oo	F <sub>S,Ä,1</sub> : 37,0	58,4	F <sub>Kon,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,23	
	pho. Äqui	0,925	0,001	F <sub>S,Ä,1</sub> : 107,0	239,0	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	0,38	
	mechanisch	0,930	<1°/oo	A <sub>KM</sub> : 11,5	22,5	F <sub>S,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,23	
SZA	kombiniert	0,930	<1°/oo	A <sub>KM</sub> : 11,5	22,5	F <sub>Kub,Ä,1</sub>	F <sub>S,Ä,1</sub>	0,23	