

# Einfluss der Eigenschaften grober Gesteinskörnung auf die Oberflächendauerhaftigkeit von Waschbetonoberflächen

FA 8.195

Forschungsstelle: Technische Universität München, cbm – Centrum Baustoffe und Materialprüfung (Prof. Dr.-Ing. C. Gehlen)

Bearbeiter: Gehlen, C. / Spengler, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juli 2012

## 1 Aufgabenstellung

Fahrbahndecken aus Beton werden in Deutschland derzeit mit einer Waschbetonoberfläche ausgeführt, die mit dem ARS Nr. 5/2006 als lärmindernde Bauweise anerkannt worden ist und seitdem verstärkt eingesetzt wird. Zur Gewährleistung dauerhaft guter Oberflächeneigenschaften soll entsprechend dem ARS Nr. 14/2006 die grobe Gesteinskörnung aus gebrochenem Festgestein mit hohem Widerstand gegen Polieren (Gestein der Kategorie PSV<sub>53</sub>) und einer Bruchflächigkeit C<sub>100/0</sub> bestehen. Die Kornform soll der Kategorie SI<sub>15</sub> genügen. Fundierte Untersuchungen, die diese Anforderungen an die zur Anwendung kommende Gesteinskörnung belegen, fehlten bis dato.

Ziel des Vorhabens war es, den Einfluss der Eigenschaften der groben Gesteinskörnung, insbesondere der Kennwerte Bruchflächigkeit, Kornform und Polierwert, auf die Dauerhaftigkeit der Eigenschaften von Waschbetonoberflächen zu untersuchen. Aus den Erkenntnissen sollten sich mögliche und sinnvolle Anforderungen an die zu verwendende grobe Gesteinskörnung ableiten lassen.

## 2 Untersuchungsmethodik

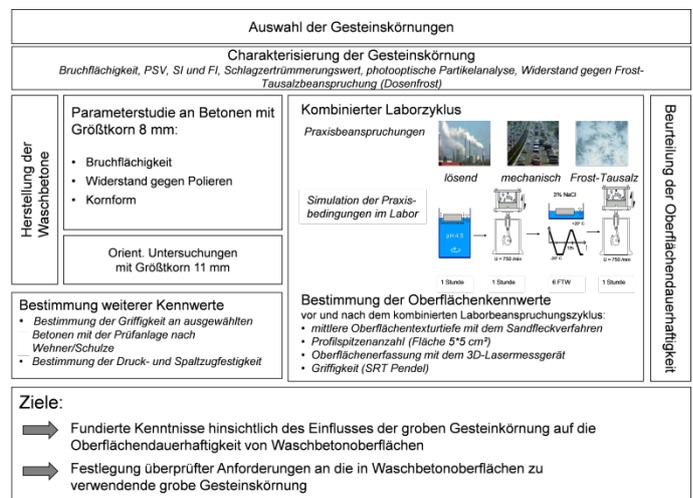
Für die Untersuchungen wurde eine praxisnahe Waschbetonrezeptur gewählt. Der Zementgehalt lag bei 430 kg/m<sup>3</sup>, der Wassergehalt bei 163,4 kg/m<sup>3</sup>. Durch die Zugabe des Luftporenmittels wurde ein LP-Gehalt im Frischbeton von 6,5 Vol.-% angestrebt. Zur Einstellung der Konsistenz (C1/C2) war kein Fließmittel notwendig. Es wurde eine Ausfallkörnung gewählt, der Quarzsand 0/2 mm stammte aus der Region Schnaittach (Mittelfranken) und die grobe Gesteinskörnung 5/8 mm wurde aus insgesamt vier verschiedenen Werken geliefert. Sie war zum einen gebrochenes Felsgestein (Werk A) und zum anderen gebrochenes Rundkorn aus den Werken B, C und D. Die Körnung aus Werk A hatte eine Bruchflächigkeit der Kategorie C<sub>100/0</sub>, alle gelieferten, gebrochenen Rundkörner (Kiessplitt) wiesen eine Bruchflächigkeit der Kategorie C<sub>90/1</sub> auf. Der ermittelte PSV der vier unterschiedlichen Gesteinskörnungen lag bei 56 bei Splitt aus Werk A, bei 54 bei Kiessplitt aus Werk B, bei 52 bei Kiessplitt aus Werk C und bei 50 bei Kiessplitt aus Werk D. Der Splitt aus Werk A wies eine Kornformkennzahl SI von 12,8 auf, die Kiessplitt B, C und D hatten Kornformkennzahlen SI von 8,7 und 3,4 bzw. 6,9. Für die Untersuchungen am Beton wurden alle Gesteinskörnungen labortechnisch aufbereitet, d. h., das Überkorn über dem Sieb 8 mm sowie das Unterkorn unter dem Sieb 5 mm wurden entfernt.

Der Einfluss der Bruchflächigkeit wurde an der Gesteinskörnung aus Werk B mit einheitlichem PSV von ermittelten 54 untersucht. Neben voll gebrochener Gesteinskörnung (Kategorie: C<sub>100/0</sub>) wurden Gesteinskörnungen der Kategorie C<sub>90/1</sub> und C<sub>90/3</sub> untersucht. Sowohl die Gesteinskörnung der Kategorie C<sub>100/0</sub> als auch die der Kategorie C<sub>90/3</sub> wurden im Labor gebrochen.

Bei den Untersuchungen zum Einfluss des Polierwiderstands wurden Gesteinskörnungen verwendet, die bei gleicher Bruchflächigkeit (C<sub>90/1</sub>) unterschiedliche Polierwiderstände aufwiesen. Die Untersuchungen erfolgten an Betonen mit den Kiessplitten der Werke B, C und D.

Der Einfluss der Kornform wurde untersucht, indem bei Betonen mit Gesteinskörnung aus Werk A bzw. B neben der Kornformkategorie SI<sub>15</sub> auch die Kategorie SI<sub>20</sub> untersucht wurde. Mit den Gesteinskörnungen aus Werk A (C<sub>100/0</sub>) und B (C<sub>90/1</sub>) wurden orientierend Versuche mit einem Größtkorn von 11 mm durchgeführt. An der Betonzusammensetzung änderte sich lediglich die Sieblinie, es wurde wieder eine Ausfallkörnung gewählt.

Die Vorgehensweise des Vorhabens ist schematisch in Bild 1 zusammengefasst.



**Bild 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise der Untersuchungen**

Am Frischbeton wurden die Frischbetontemperatur und 10 min nach Wasserzugabe das Verdichtungsmaß bestimmt. Anschließend wurden die Frischbetonrohichte und der Luftgehalt bestimmt.

Die Verdichtungsmaße lagen zwischen 1,20 und 1,34, wobei sich erwartungsgemäß ein höheres Verdichtungsmaß ergab, wenn der Beton mit Splitt hergestellt wurde. Die LP-Gehalte der Betone lagen zwischen 5,9 und 6,7 Vol.-%.

Für die Untersuchungen der Druck- und Spaltzugfestigkeit wurden Würfel (Kantenlänge von 150 mm) bzw. Zylinder (Ø = 100 mm, h = 200 mm) angefertigt. Die gemittelten Werte

der 28-Tage-Druckfestigkeiten lagen zwischen 43,5 und 50,6 N/mm<sup>2</sup>, die Spaltzugfestigkeiten nach 28 Tagen lagen zwischen 3,5 und 4,7 N/mm<sup>2</sup>.

Zur Herstellung der Probekörper zur Bestimmung der Oberflächeneigenschaften der Waschbetone wurden Schalungen der Abmessungen L x B x H = 300 x 300 x 50 mm<sup>3</sup> verwendet. Diese wurden einlagig befüllt, wobei der eingefüllte Beton vor der Verdichtung mit einem Reibbrett angedrückt wurde. Um eine möglichst homogene Oberfläche zu gewährleisten, wurde während der Verdichtung kein weiterer Beton nachgefüllt. Für die Verdichtung wurde ein Rütteltisch mit einer Frequenz von 50 Hz (Schwingbreite = 0,4 mm) verwendet. Die Probekörperherstellung entsprach der Vorgehensweise nach TP Beton-StB 10 zur Herstellung von Waschbetonlaborprobekörpern. Bei allen Betonen gelang es sehr gut, die Oberfläche mit der Glättkelle abzuziehen und eine geschlossene Mörtelschicht herzustellen. Nach der Verdichtung wurden rund 150 g/m<sup>2</sup> eines Kombinationsmittels aufgebracht, das sowohl eine verzögernde als auch eine nachbehandelnde Wirkung hat. Die Platten wurden nach 20 ± 2 h ausgebürstet.

Zunächst wurden die Waschbetonoberflächen durch die Bestimmung der Profilspitzenanzahl und der mittleren Oberflächentexturtiefe mittels des Sandfleckverfahrens charakterisiert. Insgesamt wiesen die Betone vergleichbare mittlere Oberflächentexturtiefen von rund 1 mm auf, die Anzahl der Profilspitzen lag stets zwischen 40 und 60.

Die untersuchten Einflussparameter Bruchflächigkeit und Kornform scheinen über die Packungsdichte der Gesteinskörnung und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons indirekt die Ausbildung des Waschbetonprofils zu beeinflussen. So wirkten sich hohe Bruchflächigkeiten und sogar sperrige, länglich/plattige Körner bei stets gleichbleibender Betonzusammensetzung positiv auf die Anzahl der Profilspitzen aus. Prägnanter war der Einfluss der Kornzusammensetzung selbst auf die Ausbildung der Oberfläche. So begünstigte ein hoher Anteil von 15 und sogar über 20 % an Korn 5/5,6 mm die Anzahl der Profilspitzen. Das bedeutet, dass bei Ausfallkörnungen ein höherer Anteil an Überkorn beim Sand 0/2 mm und/oder ein höherer Anteil an Unterkorn beim Splitt bzw. Kiessplitt 5/8 mm von Vorteil sein könnten. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung – also die Sieblinie – hat letztendlich einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der Profilspitzen.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften der Waschbetonoberflächen mit den verschiedenen Gesteinskörnungen erfolgten mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus. Dieser simuliert die Exposition eines Straßenbetons praxisnah und zeitraffend. Die Praxisbeanspruchung wurde dabei durch eine Kombination aus lösender (gepufferte Lösung mit pH-Wert 4,5) und mechanischer Beanspruchung (Prallabrieb) sowie Frost-Tausalzbeanspruchung (CDF-nahes Verfahren) simuliert. Die Veränderung der Oberflächeneigenschaften wurde zunächst durch Untersuchungen zur mittleren Oberflächentexturtiefe und zur Griffigkeit mit dem SRT-Pendel bewertet.

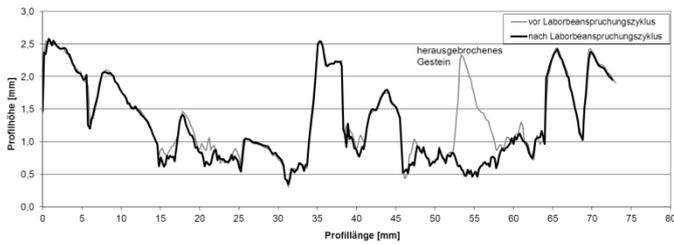
Um eine Griffigkeitsprognose für Waschbeton zu ermöglichen, wurden orientierend Untersuchungen mit der Prüfanlage Wehner/Schulze durchgeführt.

Die mittleren Texturtiefen aller Betone lagen vor dem Laborbeanspruchungszyklus bei rund 1 mm. Nach dem Laborbeanspruchungszyklus lag die geringste Zunahme der mittleren Oberflächentexturtiefe bei 0,09 mm, die höchste Zunahme lag bei 0,24 mm.

Die SRT-Werte aller Betone lagen vor dem Laborbeanspruchungszyklus zwischen 65 und 73 und nach dem Laborbeanspruchungszyklus zwischen 63 und 74. Auffallend ist, dass bei allen Betonen, bei denen der Splitt aus Werk A verwendet wurde, die SRT-Werte nach den Laborbeanspruchungszyklen geringer waren als vorher. Die Kiessplitt wiesen hingegen danach stets größere Werte auf. Dies lag vermutlich daran, dass der Granit während der Lagerung in der gepufferten Lösung mit pH-Wert 4,5 nicht angegriffen wurde, während die Kiessplitt aufgrund ihres Carbonatgehalts aufrauten. Die anschließende mechanische Beanspruchung führte dann bei allen Betonen zu einem Griffigkeitsverlust, da aber Betone mit Splitt aus Werk A zwischendurch nicht an Rauheit zunahm, war bei diesen der SRT-Wert nach dem Laborbeanspruchungszyklus geringer.

Die Untersuchungen mit der Prüfanlage Wehner/Schulze wurden an fünf Betonen durchgeführt. Die Verläufe der Einzelmessungen machen deutlich, dass die Präzision des Verfahrens zur Griffigkeitsprognose für Waschbeton ungünstig ist. Offensichtlich wird die Griffigkeitsentwicklung hauptsächlich durch die Anordnung der Gesteine an der Betonoberfläche beeinflusst, wie z. B. durch die Anzahl der Profilspitzen oder die Lage plattig/länglich geformter Gesteinskörner. Die Untersuchungen lassen keine eindeutige Aussage zu, welches Gestein hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Waschbetonoberflächen besonders günstig ist. Gleiches gilt für die Untersuchungen mit dem SRT-Pendel. Es scheint aber, dass ein Korn mit einem gemessenen PSV von 50 wie Kiessplitt D eine zu geringe Griffigkeit hat, da innerhalb der Kiessplittbetone sowohl der SRT-Wert als auch der  $\mu_{PWS}$ -Wert im unteren Bereich liegen.

Zusätzlich wurde zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Waschbetonoberflächen die Makro- und Mikrotextur anhand von Aufnahmen mit dem Doppeltriangulationssensor untersucht und die Oberflächentextur bewertet. Hierfür wurden die Oberflächen der Probekörper in Flächenmitte abgetastet. Das dortige Messfeld bestand aus 400 Messlinien, die jeweils 400 Messpunkte beinhalten. Mit einem Messpunktabstand von 200  $\mu$ m wurde dabei eine Fläche von 80 x 80 mm<sup>2</sup> erfasst. Bild 2 zeigt exemplarisch die Profile eines Betons vor und nach dem Laborbeanspruchungszyklus.



**Bild 2: Profile des Betons mit Gesteinskörnung aus Werk B vor und nach dem Laborbeanspruchungszyklus**

An den eingescannten Profilen der Waschbetonoberflächen wurden die Kennwerte  $R_q$  (quadratischer Mittelrauwert oder RMS = Root Mean Square) und  $R_p$  (mittlere Glättungstiefe oder MPD = Mean Profile Depth) mittels einer geeigneten Software bestimmt. Über die Materialanteilkurve und den Gestaltfaktor  $g$  wurde die Krümmung der Oberfläche umschrieben.

Alle Mittenrauwerte  $R_q$  der Waschbetone mit Größtkorn 8 mm lagen in einer Bandbreite von 0,370 und 0,507 mm. Bei den Betonen waren die quadratischen Mittenrauwerte nach dem Laborbeanspruchungszyklus tendenziell etwas geringer als vor dem Laborbeanspruchungszyklus, was bedeutet, dass die Oberflächen danach eine geringere Rauheit hatten. Dies korrelierte mit den Ergebnissen der Griffigkeitsmessungen mit dem SRT-Pendel. Zwischen den Mittenrauwerten und den untersuchten Parametern Bruchflächigkeit und Kornform ist keine eindeutige Korrelation zu erkennen, der Mitterauwert des Betons scheint aber geringer zu sein, je geringer der PSV der Gesteinskörnung ist.

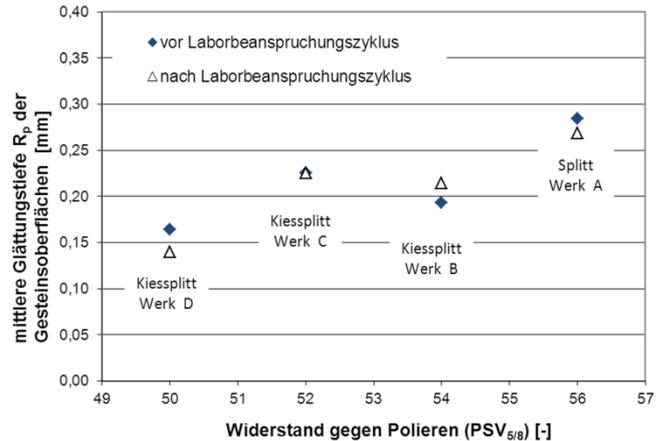
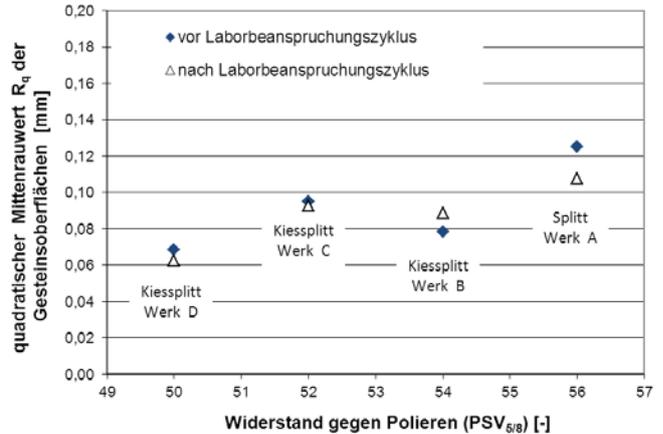
Die mittleren Glättungstiefen  $R_p$  der Betone lagen vor dem Laborbeanspruchungszyklus zwischen 1,137 und 1,302 mm. Nach dem Laborbeanspruchungszyklus waren sie bis auf eine Ausnahme (Beton mit Kiessplitt aus Werk B der Kategorie  $C_{90/3}$ ) größer, (zwischen 1,121 und 1,635 mm), aus der Erhöhung der einzelnen Kennwerte ließ sich aber nicht folgern, ob eine der hier untersuchten Gesteinskörnungen die Dauerhaftigkeit einer Waschbetonoberfläche positiv oder negativ beeinflusst.

Welchen Einfluss das Korn selbst hatte und wie groß dieser war, wurde durch die Untersuchungen zur Mikrorauheit geklärt. Hierfür wurden nur an den Gesteinskornoberflächen die Kennwerte  $R_q$  und  $R_p$  bestimmt. Bild 3 stellt die beiden Oberflächenkennwerte dar, die rund 20 bis 25 % der jeweiligen Rauheitskennwerte der Betonoberfläche entsprachen.

Die Werte des Kiessplitts D lagen deutlich unter den Werten von Splitt A, insbesondere nach dem Laborbeanspruchungszyklus. Daraus lässt sich wieder folgern, dass Kiessplitt D eine für Waschbeton zu geringe Oberflächenrauheit hat, was die Untersuchungen der Griffigkeit gemessen mit dem SRT-Pendel bestätigt.

Nach Auswertung der Materialanteilkurven zeigte sich, dass Betone mit Gesteinskörnung hoher Bruchflächigkeit offensichtlich eher eine Oberfläche aufwiesen, die einem Plateau mit Schluchten (konkav) ähneln. Eine zu günstige Kornform ( $SI_5$ ), aber auch ein hoher Anteil ungünstig geformter Körner ( $SI_{20}$ ), führten zu einer eher konvexen Gestalt ("Berge und Täler"). Anzumerken ist aber hier, dass die Gestalt einer Waschbetonoberfläche nie von nur einem einzelnen Parameter, wie z. B.

der Bruchflächigkeit oder der Kornform, abhängig ist. Vielmehr beeinflussen sich die Parameter gegenseitig und führen gemeinsam zu Frischbetoneigenschaften, die eine dichte Packung der Gesteinskörner an der Oberfläche begünstigen. Die Folgerung ist dann eine konkave Oberfläche, die dem gewünschten "Plateau mit Schluchten" ähnelt.



**Bild 3: quadratischer Mittenrauwert  $R_q$  (oben) und mittlere Glättungstiefe  $R_p$  (unten) der Gesteinskörnung aus Werk A, B, C und D**

## 4 Folgerungen für die Praxis

Folgende Anforderungen können aus den Ergebnissen an die zu verwendende grobe Gesteinskörnung abgeleitet werden:

- Bruchflächigkeit
  - Die Ergebnisse zeigen, dass es durchaus möglich ist, Waschbetonoberflächen mit einem Kiessplitt der Bruchflächigkeit  $C_{90/1}$  und sogar  $C_{90/3}$  herzustellen. Bei dem in diesen Untersuchungen verwendeten Laborbeanspruchungszyklus zeigten sich keinerlei Einschränkungen hinsichtlich der Verwendung von Kiessplitt.
- Widerstand gegen Polieren
  - Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass Kiessplitt mit einem gemessenen PSV von 50 einen zu geringen Widerstand gegen Polieren hat. Kiessplitt aus Werk C, der zwar der Kategorie

PSV<sub>51</sub> zugeteilt wird, der aber einen PSV von 52 aufwies, führte zu vergleichbaren Griffigkeiten im Beton wie die Gesteinskörnungen aus Werk B und A, an denen ein PSV von 54 bzw. 56 bestimmt wurde. Demnach wäre die Anforderung an die Kategorie PSV<sub>53</sub> zu überdenken, da ein PSV von 52 (Kiessplitt aus Werk C) ausreichte. Es sollte eine weitere Untersuchungsreihe mit einem Gesteinskorn eines gemessenen PSV von 51 erfolgen. Wird an diesem Beton eine vergleichbare Griffigkeit gemessen, wäre es durchaus vorstellbar, die Möglichkeit der Einführung der Kategorie PSV<sub>51</sub> zu prüfen. Die Kategorie PSV<sub>51</sub> würde die Verfügbarkeit der Materialien um ein Vielfaches erweitern und wäre ökologisch und ökonomisch von Nutzen. Im Rahmen der Kontrollprüfungen sollte dann aber eine mehrmalige Bestimmung des PSV gefordert sein, um die Kategorie PSV<sub>51</sub> stets zu garantieren. Für diesen Weg sind aber – wie beschrieben – noch zahlreiche Untersuchungen notwendig.

### – Kornform

Eine Änderung der Anforderung an die Kornform von derzeit SI<sub>15</sub> ist nach Auswertung aller Untersuchungen nicht zielführend. Weder eine Verschärfung der Kategorie SI<sub>15</sub> auf z. B. SI<sub>5</sub> oder eine Erhöhung des Anteils ungünstig geformter Körner (SI<sub>20</sub>) führten zu der gewünschten Oberflächentextur, die einem "Plateau mit Schluchten" ähnelt. Letztendlich muss auch gefolgert werden, dass die Oberflächengestalt nicht nur von der Menge ungünstig geformter Körner mit der Verhältniszahl  $1/d = 1/3$  abhängen kann. Es sollte zukünftig ein Augenmerk auf die gesamte Kornformverteilung gelegt werden, d. h., z. B. dass bestimmte Gehalte an Körnern mit dem Verhältnis  $1/d = 1/2,5, 1/2, 1/1,5$  usw. gefordert werden könnten.

### – Orientierende Untersuchungen mit Größtkorn 11 mm

Die Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, Waschbetonoberflächen mit einem Größtkorn von 11 mm herzustellen. Um Anforderungen an die Gesteinskörnung ableiten zu können, sind aber weitere Untersuchungen nötig.

### – Orientierende Untersuchungen zur Griffigkeitsprognose mit der Prüfanlage Wehner/Schulze

Es wird schnell deutlich, dass die Präzision des Verfahrens zur Griffigkeitsprognose für Waschbeton ungünstig ist. Demnach ist zu folgern, dass Griffigkeitsprognosen mit dem momentanen Versuchsablauf der Prüfanlage Wehner/Schulze nur bedingt möglich sind. Es ist sicherlich sinnvoll, die Messung – insbesondere die Messgummis und die Messapparatur – zu modifizieren und einen für Waschbeton neuen Bewertungshintergrund zu finden.

Neben der Ableitung der Anforderungen an die Gesteinskörnung führten die Frischbetonuntersuchungen und die Beurteilung der Waschbetonoberflächen über die mittlere Oberflächentexturtiefe und die Anzahl der Profilspitzen zu der Schlussfolgerung, dass bei Waschbeton – ähnlich wie bei Hochleistungsbetonen – die Bindemittelleimzusammensetzung gezielt auf die Gesteinskörnungszusammensetzung abgestimmt werden sollte. Besonderes Augenmerk sollte dabei bei Ausfallkörnung auf den Überkornanteil des Sandes und den Unterkornanteil der Gesteinskörnung 5/8 mm gelegt werden. Es könnte sinnvoll sein, bei der Gesteinskörnung, die aus einer Ausfallkörnung besteht, einen definierten Masseanteil bei den Siebdurchgängen durch das 4-mm-Sieb und sogar durch das 5-mm-Sieb zu fordern. Auf diese Weise könnte über die Packungsdichte der Gesteinskörnung zusammen mit der auf die Gesteinskörnung abgestimmte Bindemittelleimzusammensetzung die Konsistenz und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons gezielt eingestellt und somit die Ausbildung der Waschbetonoberfläche gesteuert werden.