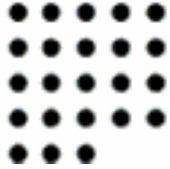




RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Verkehrswegebau
Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg



Fachhochschule Köln

Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser
Prof. Dr.-Ing. Carsten Koch

Entwicklung eines Verfahrens zur Prüfung und Bewertung des Abriebwiderstandes von Bettungs- und Fugenmaterial von Pflasterbefestigungen - Schlussbericht -

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg / Prof. Dr.-Ing. C. Koch
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Jan Ritter
Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V. (AiF)
AiF-Vorhaben Nr.: 13938 N

Dieses Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Mitglied der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), gefördert.



Bochum / Köln, im Mai 2007

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und allgemeines Vorgehen	1
2	Stand des Wissens.....	3
2.1	Materialien	3
2.1.1	Natürliche Gesteinskörnungen	3
2.1.2	Recycling-Baustoffe	5
2.1.3	Industrielle Nebenprodukte	5
2.2	Prüfverfahren	6
2.2.1	Schlagzertrümmerungs-Verfahren	6
2.2.2	Micro-Deval-Verfahren	7
2.2.3	Los Angeles-Verfahren.....	11
2.2.4	Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle.....	13
2.2.5	Kugelmühlen-Verfahren nach Dowson und Lilley.....	15
2.2.6	Deval Attrition-Test.....	16
2.2.7	Korrelationen zwischen den Verfahren.....	16
2.3	Bettungs- und Fugenmaterial.....	19
2.3.1	Die Pflasterbauweise.....	19
2.3.2	Theoretischer Hintergrund: Kraftübertragung.....	20
2.3.3	Bedeutung des Bettungsmaterials bei der Schadensentwicklung	22
2.3.4	Theorien zu dem Prozess der Schadensentwicklung.....	23
2.3.5	Schadensbild.....	24
2.3.6	Ursachen von Schäden bei Versagen der Bettung.....	24
2.3.7	Empfehlungen für Anforderungen und Prüfverfahren.....	26
2.3.8	Anforderungen an die Festigkeit von Bettungs- und Fugenmaterial.....	29
3	Prüfung des Widerstandes gegen mechanische Beanspruchung.....	31
3.1	Auswahl und Beschaffung der Proben	31
3.2	Voruntersuchungen (Rohdichte, Korngrößenverteilung)	32
3.2.1	Versuchsbeschreibung / Ergebnisse	32
3.3	Micro-Deval-, Los Angeles- und Schlagzertrümmerungs-Verfahren an den groben Gesteinskörnungen	34
3.3.1	Versuchsbeschreibung	34
3.3.2	Versuchsergebnisse	34
3.4	Kugelmühlen-Verfahren 0/2	40
3.4.1	Versuchsbeschreibung	40
3.4.2	Versuchsergebnisse	41
3.5	Fließkoeffizient an feinen Gesteinskörnungen	43
3.5.1	Versuchsbeschreibung	43

3.5.2	Versuchsergebnisse	44
4	Modifizierte Abriebprüfungen	47
4.1	Modifiziertes Micro-Deval-Verfahren (MMD) 0/5	47
4.1.1	Voruntersuchungen, Anpassung der Verfahren	47
4.1.2	Ergebnisse des MMD-Verfahrens 0/5	54
4.1.3	Variation der Auswertungsmethoden	60
4.1.4	Ergebnisse der Methoden A bis L	62
4.2	MMD-Verfahren 0/2.....	67
4.3	Kugelmühlen-Verfahren 0/5	69
4.4	Modifiziertes Proctor-Verfahren	71
5	Deutung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen	73
5.1	Untersuchung der Korrelationen zwischen den Verfahren	73
5.1.1	Allgemeines zur Berechnung und deren Darstellung	73
5.1.2	Korrelation zwischen den Ergebnissen der Methoden A bis L (MMD 0/5)	75
5.1.3	Korrelation zwischen MMD 0/5- und SZ-, LA- und MD-Verfahren	75
5.1.4	Korrelationen zwischen MMD 0/5 und Kugelmühle 0/2	76
5.1.5	Korrelation zwischen MMD 0/2 (500 U) und Kugelmühle 0/2	84
5.1.6	Korrelation zwischen Kugelmühle 0/5 und MMD 0/5	87
5.1.7	Einfluss der Rohdichte und des Fließkoeffizienten.....	90
5.2	Schlussfolgerungen aus den ermittelten Korrelationen	92
5.3	Auswertung des MMD-Verfahrens 0/5	94
5.3.1	Wahl einer geeigneten Methode	94
5.3.2	Erkennung von Ausreißern.....	94
5.4	Ermittlung von Anforderungswerte aus den Laborergebnissen.....	95
6	Bewertungshintergrund.....	99
6.1	Felduntersuchungen	99
6.1.1	Positivbeispiele	100
6.1.2	Negativbeispiele	117
6.1.3	Auswertung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen	127
6.2	Befragung von Sachverständigen und Tiefbauämtern	131
6.2.1	Vorgang.....	131
6.2.2	Ergebnisse der Befragung.....	132
6.2.3	Schlussfolgerungen aus der Befragung	138

Inhaltsverzeichnis

7	Schlussfolgerungen, Ausblick	139
7.1	Schlussfolgerungen für die Praxis.....	139
7.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	139
8	Zusammenfassung	141
9	Verzeichnisse	144
Anhang		

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Pflasterdecken eignen sich insbesondere für die Befestigung von Straßen, Wegen und Plätzen im kommunalen Bereich. Die Anwendung umfasst zudem hoch belastete Lager- und Umschlagflächen sowie Stell- und Parkflächen für Flugzeuge. In der Vergangenheit sind jedoch Schäden an höher belasteten Straßen mit Pflasterbefestigungen aufgetreten, obwohl die Anforderungen des Technischen Regelwerkes eingehalten wurden.

Die Pflasterdecke besteht aus den Pflastersteinen, dem Fugenmaterial und dem Bettungsmaterial. Durch die auf die Pflasterdecke einwirkenden statischen und dynamischen Verkehrsbelastungen werden Reibungskräfte im Bettungs- und Fugenmaterial sowie zwischen der Bettung bzw. Fugenfüllung und dem Pflasterstein verursacht. Diese wiederum führen zur Verfeinerung des Fugen- und Bettungsmaterials. Die Anreicherung von Feinkorn an der Oberfläche der Bettungsschicht führt zu Schäden in Form von horizontalen Verschiebungen der Pflastersteine. Das Feinkorn im Fugenmaterial kann infolge der Saugwirkung des Verkehrs oder Reinigungsvorgängen ausgetragen oder aufgrund von Erosion und Suffosion in die Bettung eingespült werden. Dabei vermindert der Volumenverlust der Fugenfüllung den für die schadfreie Ableitung der Lasten kritischen Verbund der Decke. Zudem kann die Feinkornanreicherung eine herabgesetzte Wasserdurchlässigkeit verursachen, so dass ein regelmäßiger Wasseraufstau in der Pflasterdecke entsteht.

Die geschilderten Schadensformen verdeutlichen, dass die Abriebbeständigkeit der für die Bettung und Fugen verwendeten Gesteinskörnungen über die Beständigkeit der Pflasterdecke entscheidet.

1.2 Zielsetzung und allgemeines Vorgehen

Die Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Gesteinskörnungen erfolgt nach DIN EN 1097-2 [1] mit dem Los Angeles-Verfahren an der repräsentativen Körnung 10/14 mm oder z. Zt. noch mit dem Schlagversuch an der repräsentativen Körnung 8/12 mm. Die für Bettungs- und Fugenmaterialien relevanten Gesteinskörnungsgemische mit einem Größtkorn von 2 bis 5 mm werden daher durch die Prüfungen auch des neuen Regelwerkes nicht erfasst. Die Übertragung der Ergebnisse einer Festigkeits- bzw. Abriebprüfung an groben Körnungen auf ein vornehmlich aus feinen Körnungen bestehendes Gemisch ist jedoch nur bedingt möglich, da sich infolge des Herstellungsprozesses minderfestes Gestein in den feinen Kornfraktionen ansammeln kann. Um die Eignung von Bettungs- und Fugenmaterialien für Pflaster-

befestigungen zu prüfen, ist daher eine Prüfvorschrift wünschenswert, die diese Charakteristika berücksichtigt.

Geeignet für diese Problemstellung könnten das Prüfverfahren zur Bestimmung des Abriebs mit der Kugelmühle nach TP Min-StB Teil 5.4.2 [2] und ein zu modifizierendes Prüfverfahren zur Bestimmung des Verschleißes mit dem Micro-Deval-Gerät in Anlehnung an DIN EN 1097-1 [3] und an die französische Norm NF P 18-576 [4] sein. Erfahrungs- oder Anforderungswerte gibt es jedoch für beide Verfahren nicht.

Ziel der Forschungsarbeit ist es daher, ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Abriebwiderstandes von Gesteinskörnungen für die Bettung und Fugenfüllung von Pflasterbefestigungen zu entwickeln. Anschließend soll für das gewählte Prüfverfahren ein Bewertungshintergrund für repräsentative Gesteine erarbeitet werden. Dieser Bewertungshintergrund soll mit baupraktischen Erfahrungen verglichen werden, um eine Grundlage zur Definition von Anforderungswerten an Gesteinskörnungen für Bettungs- und Fugenmaterialien zu schaffen. Abschließend ist die Empfehlung von Anforderungswerten an den Abriebwiderstand von Bettungs- und Fugenmaterialien von Pflasterdecken zu formulieren.

Weiterhin soll die Eingangsthese überprüft werden, ob zwischen den Ergebnissen an feinen Gesteinskörnungen 0/2 mm bzw. 0/5 mm bei der Prüfung des Abriebwiderstandes in der Kugelmühle nach TP Min-StB sowie mit einer angepassten Variante des Micro-Deval-Verfahrens im Vergleich zum Los Angeles-Verfahren nach DIN EN 1097-2 und dem Micro-Deval-Verfahren nach DIN EN 1097-1 an groben Körnungen 10/14 mm Zusammenhänge bestehen.

Abschließend sollen geeignete Anforderungen an den Abriebwiderstand zur Aufnahme in das Regelwerk gefunden werden.

Das vorliegende Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Mitglied der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), gefördert.

2 Stand des Wissens

2.1 Materialien

Für die in den Kapiteln 3 und 4 dargestellten Untersuchungen sollen repräsentative Gesteine verwendet werden. Daher werden im Folgenden in Frage kommende Gesteinsarten kurz charakterisiert.

2.1.1 Natürliche Gesteinskörnungen

Die natürlichen Gesteine werden in Abhängigkeit ihrer Entstehung (Genese) in die drei Hauptgruppen magmatische, Sediment- und metamorphe Gesteine unterteilt. Die in diesem Kapitel enthaltenen Beschreibungen der natürlichen Gesteinskörnungen beruhen auf [5; 6; 7; 8].

I Magmatische Gesteine

Magmatische Gesteine sind bei der Erstarrung magmatischer Schmelzen entstanden. Nach Entstehungsbedingungen und den Gefügemerkmalen wird zwischen drei Arten der magmatischen Gesteine unterschieden:

Tiefengesteine (Intrusivgesteine oder Plutonite), die in tiefen Bereichen der Erdkruste bei langsamer Abkühlung relativ grobkörnig kristallisiert sind.

Ganggesteine, welche bei hohen Drücken relativ schnell abgekühlt sind und meist mit porphyrischem Gefüge erstarrt sind.

Ergussgesteine sind durch Austritt des Magmas (Lava) an der Erdoberfläche oder auf dem Meeresboden entstanden. Aufgrund der raschen Abkühlung ist das Gefüge feinkörnig und oft porphyrisch ausgeprägt. Porphyrische Gesteine weisen Einsprenglinge und eine ungleichmäßige Struktur auf.

- **Granit** ist ein magmatisches Gestein und zählt zu der Klasse der Tiefengesteine. Granite bestehen zum überwiegenden Teil aus Alkalifeldspat, Plagioklas, Quarz und Biotit. Sie weisen eine meist mittel- bis grobkörnige Struktur auf. Aufgrund des hohen Quarzgehaltes besitzt der Granit eine hohe Abnutzungshärte und Verwitterungsbeständigkeit.
- **Diabas** ist ein magmatisches Gestein und gehört zu den Ergussgesteinen. Diabase sind meist dicht bis mittelkörnig, mitunter auch grobkörnig und können durch Feldspateindringlinge ein porphyrisches Gefüge aufweisen.
- **Basalt** ist ein magmatisches Gestein und gehört wie der Diabas der Klasse der Ergussgesteine an. Das Gefüge ist dicht- bis mittelkörnig, auch porphyrisch, ausgeprägt. Gelegentlich können Hohlräume durch einstige Gasblasen auftre-

ten; Basalt ist aber selten stark porig. Das Gefüge ist meist sperrig, was den Basalt zu einem besonders zähen und beständigen Gestein macht. Der Quarzgehalt des Basaltes kann bis zu 20 % betragen.

- **Rhyolit** (veraltete Bezeichnung: Quarzporphyr) gehört zu der Klasse der magmatischen Gesteine und wird den Ergussgesteinen zugeordnet. Die Struktur des Rhyolithes ist porphyrisch, wobei die Grundmasse ganz oder teilweise glasig sein kann. Rhyolith gilt als dichtes bis feinkörniges Gestein. Kennzeichnend für den Rhyolith sind Einsprenglinge aus Alkalifeldspat, Plagioklas und Quarz. Der Rhyolith stellen das vulkanische Äquivalent zu den Graniten dar.
- **Basanit** zählt zu den magmatischen Gesteinen der Untergruppe der Ergussgesteine. Basanite sind dunkle, dichte bis poröse Gesteine und weisen eine meist porphyrische Struktur auf.

II Sedimentgesteine

Sedimentgesteine sind an der Erdoberfläche, in festländischen Gewässern oder im Meer gebildet worden. Die Sedimentgesteine werden in zwei Gruppen nach Art der Ablagerungen eingeteilt:

- Klastische Sedimente
- Chemische und biogene Sedimente

Die Einteilung der klastischen Sedimentgesteine erfolgt in Abhängigkeit der Korngröße ihrer Komponenten.

- **Kalkstein** wird der Gruppe der Sedimentgesteine zugeordnet und zählt dort zu den chemischen Sedimenten. Er weist ein dichtes bis grobkörniges, meist aber sehr feinkörniges Gefüge auf. Mit mindestens 80 % ist Calcit (Kalkspat) der Hauptbestandteil des Kalksteins. Kalkstein kann aus feinkristallinem Kalkschlamm oder aus zusammengeschwemmten Kalkschalen oder anderen karbonatischen Organismenresten entstanden sein. Das Erscheinungsbild der Kalksteine weist eine große Variationsbreite auf; die strukturelle Vielfalt ist ausgeprägt. Er weist Beimengungen von Ton, Schluff, Quarz oder Sand und Dolomit auf; bei letzterem wird von dolomitischem Kalkstein gesprochen.
- **Grauwacke** ist der Entstehung nach ein Sedimentgestein und zählt zu der Gruppe der klastischen Sedimente. Das Gefüge ist fein- bis grobkörnig, zum Teil auch feinkonglomeratisch. Grauwacken sind allgemein stark verfestigt. Sie enthalten Quarz, Gesteinsreste, Feldspat und als Beimengung Glimmer, Chlorit, Carbonat- und Tonsubstanz.

III Metamorphe Gesteine

Metamorphe Gesteine sind aus magmatischen Gesteinen oder Segmentgesteinen durch Umkristallisation hervorgegangen. Je nach vorherrschenden Druck- und Temperaturbedingungen entstehen in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein sehr unterschiedliche Metamorphite. Die Metamorphite werden in die Gruppen der schiefrigen und nicht schiefrigen Metamorphite unterteilt.

- **Quarzite** werden der Gruppe der nicht schiefrigen metamorphen Gesteine zugerechnet. Sie sind aus Kieselstein durch Regional- oder Kontaktmetamorphose unter Gefügeänderung entstanden. Quarzite setzen sich mehrheitlich aus Quarz zusammen und weisen Nebenbestandteile wie Muskovit auf. Ihr Gefüge ist fein- bis mittelkörnig.
- **Gneis** ist ein metamorphes Gestein, welches der Untergruppe der schiefrigen metamorphen Gesteine zugerechnet wird. Grobkörniger Glimmerschiefer wird als Gneis bezeichnet. Das Gefüge des Gneises ist mittel- bis grobkörnig und weist ein ausgeprägtes Parallelgefüge auf (lagige Textur). Es wird unterschieden zwischen dem **Orthogneis**, der aus magmatischem Ausgangsgestein entstanden ist sowie dem **Paragneis**, der aus sedimentärem Ausgangsgestein entstanden ist. Der Orthogneis weist eine massige bis schiefrige Struktur auf. Hauptbestandteile des Gneis sind Quarz, Feldspäte und Glimmer.

2.1.2 Recycling-Baustoffe

Recycling-Baustoffe (RC-Baustoff) oder *auch rezyklierte Gesteinskörnungen* entstehen durch die Aufbereitung anorganischen bzw. mineralischen Materials, das zuvor als Baustoff eingesetzt wurde. Zu den Inhaltsstoffen eines RC-Baustoffes zählen unter anderem Beton, Ziegel, Schlacken und Asphalt.

Die TL Gestein-StB [9] enthalten Anforderungen an die Verwendung von RC-Baustoffen im Straßenbau. Unter anderem ist die zulässige Menge von Ziegel in RC-Baustoffgemischen auf 30 M.-% beschränkt.

2.1.3 Industrielle Nebenprodukte

Industrielle Nebenprodukte *oder auch industriell hergestellte Gesteinskörnungen* fallen als Nebenprodukt eines industriellen Prozesses an und können nach einer Aufbereitung und unter Einhaltung bestimmter Anforderungen als Baustoff verwendet werden. Zu den industriellen Nebenprodukten zählen u. a. das Schmelzkammergranulat, der Hüttensand und die Stahlwerkschlacke.

- **Schmelzkammergranulat** entsteht bei der Energiegewinnung in Steinkohlekraftwerken. Sie stellt die im Wasserbad erstarrte Schmelze der nicht brennbaren, mineralischen Bestandteile der Kohle dar. Die abrupte Abkühlung im Wasserbad bewirkt ein Zerspringen der flüssigen Schlacke in granulierten Körner. Die durch weitere Abkühlungsprozesse innerhalb der Körner verursachten Eigenspannungen werden üblicherweise durch Brechen beseitigt.
- **Hüttensand** bezeichnet die glasig erstarrte und granulierten Hochofenschlacke bei rascher Abkühlung durch Wasser oder Luft. Er weist latent hydraulische Eigenschaften auf und wird hauptsächlich zur Zementherstellung, aber auch im Verkehrswegebau eingesetzt.
- **Stahlwerkschlacke** entsteht als Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Eisen oder Schrott zu Stahl. Aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Dichte findet die Stahlwerkschlacke in vielen Bereichen des Bauwesens Anwendung als Baustoff. Stahlwerkschlacke aus dem Linz-Donawitz-Verfahren wird LD-Schlacke genannt.

2.2 Prüfverfahren

2.2.1 Schlagzertrümmerungs-Verfahren

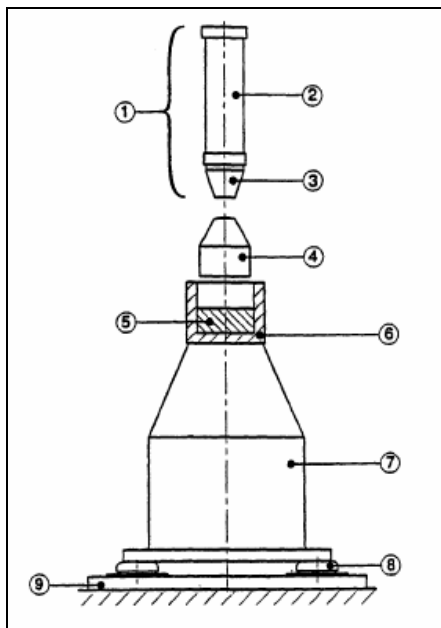
Das Schlagzertrümmerungs-(SZ-)Verfahren nach DIN EN 1097-2 [1] dient der Bestimmung des mechanischen Widerstandes gegen Zertrümmerung. Die Gesteinskörnungen werden im Schlagversuch ausschließlich durch Schlag beansprucht.

Für den Schlagversuch wird in Abhängigkeit von der Rohdichte ein Korngemisch 8/12,5 mm zu 50 M.-% aus der Kornklasse 8/10 mm, 25 M.-% der Kornklasse 10/11,2 mm und 25 M.-% der Klasse 11,2/12,5 mm zusammengesetzt und anschließend in einen Mörtel eingefüllt. Die Beanspruchung erfolgt durch zehn Schläge mit einem Fallhammer aus 370 mm Höhe.

Der Aufbau des Prüfgerätes für das Schlagzertrümmerungs-Verfahren ist schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt. Aus den Durchgängen durch fünf Siebe mit Öffnungsweiten zwischen 0,2 bis 8 mm wird der Schlagzertrümmerungswert, kurz SZ-Wert, nach folgender Formel (2-1) berechnet:

$$SZ = \frac{M}{5} \quad [\text{M.-%}] \quad (2-1)$$

SZ stellt dabei die auf die fünf Analysensiebe (0,2 / 0,63 / 2 / 5 / 8 mm) bezogene Summe der Siebdurchgänge als Massenanteil in Prozent dar.



Legende:

- 1 Fallhammer
- 2 Schlagschaft
- 3 Schlagkopf
- 4 Stempel
- 5 Probe
- 6 Mörser
- 7 Amboss
- 8 Schwingelement

Abbildung 2-1: Prinzipskizze Schlagprüfgerät

Frühere Varianten des Schlagversuchs erlaubten die Untersuchung verschiedener Kornklassen. Die TP Min-StB [2] beinhaltete zudem Prüfanleitungen für feinere Kornklassen, die aufgrund unzureichender Prüfgenaugkeit aber zurückgezogen wurden und hier nicht weiter behandelt werden sollen. Wieden sagte 1973 in Bezug auf vorangegangene Untersuchungen aus, dass für die Korngröße 8/12 mm das Verfahren eine brauchbare Differenzierung der Messwerte liefert, wogegen bei feineren Körnungen die Aussagefähigkeit zurückgeht [10].

Der Schlagversuch erfordert nach [11] einen hohen Aufwand an Eichungen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Zudem ist das Prüfgerät kostspielig in der Anschaffung.

Der Schlagversuch wurde aufgrund seiner weiten Verbreitung in Deutschland sowie den reichlichen Erfahrungen als nationale Alternative zum Los Angeles-Verfahren in die DIN EN 1097-2 aufgenommen. Inwieweit Alternativverfahren in den europäischen Normen weiterhin Bestand haben, wird z. Zt. diskutiert.

2.2.2 Micro-Deval-Verfahren

Bereits 1878 wurde nach [12] in der *École Nationale des Ponts et Chaussées* in Paris der Deval-Versuch zur Ermittlung des „Abschleifverlustes“ von Gesteinskörnungen für Schotterstraßen entwickelt, der in seinen Grundzügen dem heute bekannten Verfahren entspricht. Dazu wurde die Prüfprobe in eine Trommel ohne Zu-

satz von Wasser oder Reibladung eingebracht und nach 10.000 Umdrehungen bei 30 bis 33 U/min über einem 1,68 mm-Sieb gesiebt. Aus dem Durchgang wurde der Abschleifverlust bestimmt.

Um Schwierigkeiten bei der Prüfung von sehr harten Gesteinsarten zu vermeiden, wurde in der *Norme Francaise* P 18-576 [4] die Zugabe von Wasser und Stahlkugeln als Reibmittelladung eingeführt, welche nach der ursprünglichen Vorschrift nicht vorgesehen war. Damit bestand im Vergleich zum Los Angeles-Verfahren (LA-Verfahren) die Möglichkeit, den Einfluss des Wassers bei Abriebbeanspruchung zu berücksichtigen. Im Zuge der Europäischen Normung wurde 1996 die DIN EN 1097-1:1996 herausgegeben; die aktuelle Fassung stellt die Ausgabe DIN EN 1097-1:1996 + A1:2003 [3] dar.

Zur Prüfung von groben Gesteinskörnungen 10/14 mm wird nach DIN EN 1097-1 entsprechend des Vorgehens beim LA-Verfahren die Probe mit einem zu wählenden Zwischensieb unter bestimmten Vorgaben zusammengesetzt. Die Gesamtmasse der bis zur Massenkonzanz getrockneten Probe soll 500 ± 2 g betragen. Die Probe wird mit 2,5 l Wasser sowie Stahlkugeln in eine der Trommeln ($l = 154$ mm, $d = 200$ mm) gegeben. Dabei sollen die Stahlkugeln einen Durchmesser von $10 \pm 0,5$ mm und eine Gesamtmasse von 5.000 ± 5 g aufweisen. Das zur Prüfung verwendete Gerät ist in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

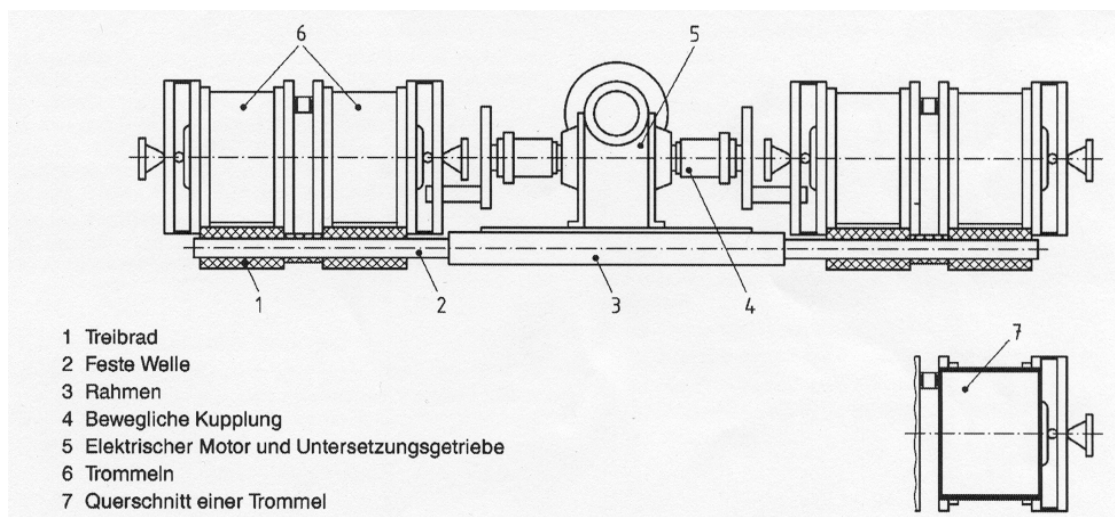


Abbildung 2-2: Micro-Deval Gerät nach DIN EN 1097-1 (Schema)

Nach 12.000 Umdrehungen der Trommel mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 ± 5 U/min ist der Rückstand der Probe auf dem 1,6 mm-Sieb zu bestimmen. Der Micro-Deval-Koeffizient ist als Mittelwert aus zwei Einzelbestimmungen nach folgender Gleichung (2-2) zu bestimmen:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5} \text{ [M.-%]} \quad (2-2)$$

mit: m = Masse des Siebrückstandes auf 1,6-mm-Sieb nach Beanspruchung [g]
 M_{DE} = Micro-Deval-Koeffizient [M.-%]

Die Bezeichnung MDE für den Versuch mit Zugabe von Wasser kann auf das französische „en eau“ = „in Wasser“ zurückgeführt werden. Im Vergleich dazu wird der bei der trockenen Prüfung ermittelte Wert in Anlehnung an das französische „sans eau“ = „ohne Wasser“ als M_{DS} bezeichnet [13].

Das Micro-Deval-Verfahren (MD-Verfahren) nach [3] bewirkt eine Beanspruchung der Probe, die im Vergleich zum LA-Verfahren stärkere Anteile an mahlender Beanspruchung aufweist. Dafür spricht die Konstruktion der Trommel, die keine Mitnehmerleiste aufweist. Hierdurch kommt es nicht zur Mitnahme der Stahlkugeln und des Materials, die ab einem Drehwinkel wieder auf den Boden der Trommel fallen würden. Die Probe befindet sich während des Drehvorgangs in der unteren Rundung der Trommel und wird zusammen mit den Stahlkugeln kontinuierlich durchgemischt. Diese durch die Drehung der Trommel erzeugte Bewegung ist mit einem Reiben der Körner untereinander, mit den Stahlkugeln und an der Innenwand verbunden, wodurch eine mahlende Abriebbeanspruchung erzeugt wird. Nach [10] erfolgt die Zerstörung der Körner in erster Linie durch gegenseitiges, tangenciales Aufreiben zwischen den Körnern bzw. zwischen den Körnern und den Kugeln. Die Abriebwirkung des MD-Verfahrens kann nach [14] als „primär mahlend, sekundär schlagend“ eingestuft werden kann.

Für die primär mahlende Wirkung spricht die Betrachtung der Körner vor und nach Versuchsdurchführung. Die beanspruchten Körner sind poliert und weisen im Vergleich zum ursprünglichen Zustand abgerundete Kanten auf [12].

In den Anhängen A und B der DIN EN 1097-1 sind Vorgaben für die Durchführung der Prüfung ohne Wasser sowie mit anderen Kornklassen zwischen 4 bis 16 mm aufgeführt.

Verfahren nach der Norme Francaise P 18-576

Die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen 0/2 mm mit der Deval-Prüfapparatur ist in den Europäischen Normen nicht vorgesehen. Eine Prüfvorschrift hierzu stellt die französische NF P 18-576, Teil 2 „*Mesure du coefficient de friabilité des sables*“ [4] dar. Dazu wird eine Probe der Kornklasse 0,2/2 mm oder 0,2/4 mm mit einer Reibladung und 2,5 l Wasser in eine horizontal rotierende Stahltrommel gegeben und während 1.500 Umdrehungen beansprucht. Aus dem Massenanteil < 0,1 mm nach

Beanspruchung lässt sich der MD-Koeffizient in Anlehnung an die Formel (2-2) berechnen.

Masse der Prüfprobe, Menge des Wassers und Rotationsgeschwindigkeit entsprechen den Vorgaben der EN 1097-1. Abweichungen liegen in der Innenlänge der Trommel, welche nach der NF P 18576 etwa zweifach so lang ist, der geringeren Anzahl der Umdrehungen sowie der Masse und Größe der Stahlkugeln. Als Reibladung dienen die in Bild 2-1 gezeigten unterschiedlich großen Stahlkugeln: 9 Kugeln mit $\varnothing = 30$ mm (975 g), 21 Kugeln mit $\varnothing = 18$ mm (490 g) und so viele Kugeln mit $\varnothing = 10$ mm, bis das Gesamtgewicht der Reibladung von 2.500 ± 4 g erreicht wird [13].



Bild 2-1: Reibladung nach NF P 18-576, Teil 2

Method of Test for the Resistance of Fine Aggregate for Concrete and Asphalt

Das Micro-Deval-Verfahren zur Untersuchung von feinen Gesteinskörnungen für Beton und Asphalt ist in jüngster Zeit in Kanada als Ersatz für den Sulfat-Test eingeführt worden [15; 16].

Nach den Vorgaben der CSA A23.2-23A [17] wird eine repräsentative Probe mit der Masse von 500 g nach Auswaschen der Anteile $< 75 \mu\text{m}$ 24 Stunden in Wasser gelagert. Nach dem Entfernen des Überschusswassers wird die gesättigte Probe in einen Stahlkrug mit einem Volumen von 5 l gegeben. Hinzugefügt werden 750 ml Wasser und 1.250 ± 5 g Stahlkugeln mit einem Durchmesser von $9,5 \pm 0,5$ mm und der Stahlbehälter anschließend verschlossen. Der Behälter wird 15 min mit einer Geschwindigkeit von 100 ± 5 U/min um seine Achse rotiert. Anschließend wird nach

Entfernen der Stahlkugeln die Probe auf einem 75-µm-Sieb gewaschen. Der Micro-Deval-Koeffizient berechnet sich entsprechend dem zuvor beschriebenen Micro-Deval-Verfahren nach folgender Formel (2-3) aus dem Massenverlust < 75 µm der ursprünglichen Probe:

$$MD = \frac{D_{75 \mu m}}{500 \text{ g}} \cdot 100 [\text{M.} - \%] \quad (2-3)$$

mit $D_{75 \mu m}$ = Durchgang durch das 75 µm-Sieb [g]
 MD = Micro-Deval-Koeffizient (CSA) [M.-%]

2.2.3 Los Angeles-Verfahren

Das Los Angeles-Verfahren wurde Mitte der 1920er im städtischen Prüflabor von Los Angeles, Kalifornien, entwickelt und zählt zu den in der USA am meisten verbreiteten Prüfverfahren für die Bestimmung der mechanischen Festigkeit von groben ungebundenen Gesteinskörnungen [18]. Zur Prüfung wird die Messprobe zusammen mit einer festgelegten Ladung aus Stahlkugeln in eine rotierende Trommel gegeben. Der Los Angeles-Koeffizient wird nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen aus dem Massenanteil der Körnungen < 1,6 mm ermittelt.

In Deutschland ist die Anwendung nach der DIN EN 1097-2 geregelt, die das LA-Verfahren als Referenzverfahren neben dem Schlagversuch zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen aufführt. Nach der DIN EN 1097-2 kann der LA-Koeffizient an Proben der Kornklasse 10/14 mm ermittelt werden, ergänzend sind in Anhang A Vorgaben für die alternative Prüfung der Kornklassen 4/8 mm, 6,2/10 mm, 8/11,2 mm und 11,2 /16 mm enthalten.

Die zu untersuchende Probe 10/14 mm mit einer Masse von $5.000 \pm 5 \text{ g}$ wird unter Berücksichtigung von Vorgaben an den Durchgang durch ein Zwischensieb von 11,2 oder 12,5 mm zusammengesetzt. Die Ladung besteht aus 11 Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 45 bis 49 mm und einer Gesamtmasse von 4.690 bis 4.860 g. Probe und Ladung werden ohne Zusatz von Wasser in eine in Bild 2-2 gezeigte Hohltrommel mit einem Innendurchmesser von $711 \pm 5 \text{ mm}$ und einer Innenlänge von $508 \pm 5 \text{ mm}$ gegeben. Die Los Angeles-Prüfmaschine wird so eingestellt, dass die Trommel mit einer konstanten Drehgeschwindigkeit von 31 bis 33 U/min insgesamt 500 Umdrehungen durchführt. Dabei bewirkt eine an der Innenseite der Trommel angebrachte Mitnehmerleiste, dass Teile der Probe und Stahlkugeln in Drehrichtung angehoben werden und nach Überschreiten des höchsten Punktes hinabfallen.



Bild 2-2: Los Angeles-Trommel

Die anschließende Siebung über dem 1,6 mm-Analysensieb wird zur Bestimmung der durch die Beanspruchung erzeugten Zerkleinerung der Probe vorgenommen. Aus dem Rückstand wird mit der folgenden Formel (2-4) der Los Angeles-Koeffizient berechnet.

$$LA = \frac{5000 - m}{5000} \cdot 100 \quad [\text{M.} - \%] \quad (2-4)$$

mit: m = Masse des Siebrückstandes auf 1,6 mm-Sieb nach Beanspruchung [g]
 LA = Los Angeles-Koeffizient [M.-%]

Ein geringer LA-Koeffizient entspricht einem hohen Widerstand der Gesteinskörnung gegen Zertrümmerung.

Im Vergleich zu anderen Verfahren, die nach dem Prinzip einer Kugelmühle arbeiten, bewirkt die Mitnehmerleiste an der Innenseite der Trommel eine Beanspruchung der Probe durch Mahlen und Schlag. Die unterschiedlichen Arten der Beanspruchung werden bei einer näheren Betrachtung der Vorgänge im Inneren der Trommel deutlich.

Die Drehung der Trommel übt auf das Prüfgut eine Kraft in Richtung der Drehbewegung aus. Aufgrund der glatten Innenseite der Trommel wird das Prüfgut nur geringfügig angehoben und rutscht wieder auf den Boden der Trommel. Dabei entstehen Reibungskräfte zwischen den Körnern untereinander sowie der Stahloberfläche und den Körnern, die zu einer mahlenden Beanspruchung des Prüfgutes führen. Zudem rollen die Stahlkugeln aufgrund ihrer großen Masse auf dem Prüfgut am Boden der Trommel und bewirken eine zusätzliche mahlende Beanspruchung.

Neben der mahlenden Beanspruchung kommt es nach [14] zu einer schlagenden Beanspruchung, wenn in der nächsten Phase die Mitnehmerleiste Prüfgut und Stahl-

kugeln in Drehrichtung anhebt. Mit abnehmendem Winkel zwischen Leiste und Horizontale lösen sich Prüfgut und Stahlkugeln und fallen zurück auf den Boden der Trommel. Bei Auftreffen der Stahlkugeln auf die Körner kommt es zu Zerkleinerungen in Form von Abplatzungen und Zertrümmerungen der Körner. Zusätzlich werden die herabfallenden Körner durch das Aufschlagen am Boden beansprucht und üben zugleich eine Schlagbeanspruchung auf das am Boden der Trommel verbliebene Material aus. Das genaue Verhältnis von schlagender zu mahlender Beanspruchung ist nach [14] vermutlich nicht zu ermitteln, wobei die Einstufung als ein Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung nach [11] für eine primär schlagende Beanspruchung spricht.

Die Prüfung von verschiedenen Kornklassen zwischen 2 und 32 mm und Korngemischen zwischen 5 bis 32 mm ist in nationalen Normen wie der ASTM C 131-81 [19] und der ÖNORM B3128 [20] geregelt. Vor Einführung der Europäischen Normung wurde das LA-Verfahren an der Prüfkörnung 4/8 mm durchgeführt. Eine Umrechnung der Werte auf die Prüfkörnung 10/14 mm ist nach [21] nicht möglich.

Das Verfahren ist nach [18] vergleichsweise einfach, kostengünstig und schnell durchzuführen sowie vergleichsweise weit verbreitet.

2.2.4 Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle

Die Prallprüfung von Sand nach den TP Min-StB, Teil 5.4.2 ist ein Verfahren zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von feinen Gesteinskörnungen 0,09/2,0 mm gegen Abrieb. Die Prallprüfung an Sand wird im Folgenden als Kugelmühlen-Verfahren bezeichnet.

Die zu untersuchende Probe wird mit einer Gesamtmasse von $100 \pm 0,6$ g nach folgendem Schema zusammengesetzt:

- 40 M.-% der Kornklasse 0,71/2 mm (40 g)
- 40 M.-% der Kornklasse 0,25/0,71 mm (40 g)
- 20 M.-% der Kornklasse 0,09/0,25 mm (20 g)

Die Probe wird anschließend mit einer Reibladung in einen zylindrischen Porzellanbehälter (Inhalt: 1,5 l; Höhe: 165 mm; \varnothing 150 mm (Innenmaße)) gegeben, der um seine Längsachse mit konstanter Geschwindigkeit gedreht wird. Als Reibladung werden Mahlkugeln aus Hartporzellan verwendet, jeweils 5 Kugeln mit $\varnothing = 40$ mm und 4 Kugeln mit $\varnothing = 30$ mm. Die Mühle wird verschlossen und in 500 s 1000 mal um ihre Längsachse gedreht (siehe Bild 2-3 und 2-4).



Bild 2-3: Kugelmühle



Bild 2-4: Reibladung und Trommel

Zur Auswertung werden die Durchgänge in M.-% durch die zur Zusammensetzung der Probe verwendeten Siebe nach Beendigung des Drehvorgangs bestimmt. Der Abriebwert A_{KM} ergibt sich aus der Differenz der Durchgänge vor und nach Beanspruchung der Probe, bezogen auf die Anzahl der Siebe. Nach folgender Gleichung (2-5) kann der Abriebwert berechnet werden:

$$\begin{aligned} A_{\text{KM}} &= \frac{\sum \text{Siebdurchgänge (nachher)} - \sum \text{Siebdurchgänge (vorher)}}{\text{Anzahl Siebe} < 2 \text{ mm}} \\ &= \frac{\sum \text{Siebdurchgänge (nachher)} - 80}{3} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Die Auswertung beschränkt sich im Vergleich zu anderen Verfahren demnach nicht auf ein bestimmtes Prüfsieb. Stattdessen wird die gesamte Änderung der Korngrößenverteilung infolge der Verfeinerung der Probe berücksichtigt. Der Abriebwert ist als arithmetisches Mittel aus drei Einzelwerten auf 0,1 M.-% zu runden.

Bei der Prallprüfung in der Kugelmühle liegt aufgrund der fehlenden Mitnehmerleiste eine überwiegend mahlende Beanspruchung vor.

2.2.5 Kugelmühlen-Verfahren nach Dowson und Lilley

Das von Dowson und Lilley in Großbritannien in den 90er Jahren entwickelte Verfahren (*Bottle rolling test*) entspricht hinsichtlich der Prüfapparatur weitgehend dem in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Kugelmühlen-Verfahren nach den TP Min-StB. Ziel der Entwicklung war ein einfach zu handhabendes und technisch unkompliziertes Verfahren, welches zur weiterführenden Prüfung von Bettungsmaterial eingesetzt werden sollte [22].

Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Kugelmühle: Die ofengetrocknete Probe mit einer Gesamtmasse von 500 g wird zunächst gesiebt und anschließend zusammen mit 2 Stahlkugeln ($\varnothing = 25 \text{ mm}$, Masse: $75 \pm 5 \text{ g}$) in einen zylindrischen Porzellanbehälter gegeben (Bild 2-5). Daraufhin wird der Behälter sechs Stunden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 U/min horizontal gedreht.



Bild 2-5: Dowson-Lilley-Verfahren (*Bottle rolling test*)

Nach Ende der Belastungszeit wird die Korngrößenverteilung der Probe bestimmt. Es ist zu überprüfen ob folgende Anforderungen nach [23] eingehalten werden:

Sieböffnungsweite	Maximale Zunahme	Obergrenze Durchgang
0,075 mm	2 M.-%	2 M.-%
0,150 mm	5 M.-%	15 M.-%
0,300 mm	5 M.-%	35 M.-%

Dieses Verfahren enthält demnach präzise Anforderungen an die Beständigkeit der Gesteinskörnungen im feinen Bereich. Das *Tech Spec* [16] des *ICPI* nennt u. a. das Dowson-Lilley-Verfahren zur Überprüfung der Abriebfestigkeit des Bettungsmaterials bei außergewöhnlichen Belastungen der Pflasterfläche.

2.2.6 Deval Attrition-Test

Der *Deval Attrition-Test* dient der Bestimmung des Widerstandes von Gesteinskörnungen gegen Abnutzung durch Abrieb (*wear by attrition*). Die Prüfung war in der BS 812 [24] vor 1960 und in der American Society for Testing and Materials Standard D2-1968 [25] bis 1972 enthalten. Heutzutage wird sie noch von der Britischen Bahn verwendet, um Gleisschotter zu untersuchen.

Zur Durchführung der Prüfung wird eine Probe der Körnung 37,5/50 mm nach bestimmten Vorgaben zusammengesetzt und mit Wasser in einen Stahlzylinder gegeben, der anschließend 10.000 Rotationen um seine Achse ausführt. Eine Besonderheit des Verfahrens stellt die schräge Neigung des Zylinders um 30° dar. Im Unterschied zu anderen Verfahren wird keine Reibladung in Form von Stahlkugeln oder dergleichen zu der Probe gegeben.

2.2.7 Korrelationen zwischen den Verfahren

Ballmann bestätigte die bereits 1969 erkannte Korrelation zwischen den Ergebnissen des Los Angeles-Verfahrens und des SZ-Verfahrens. Nach [26] kann von einer nahezu linearen Abhängigkeit zwischen den Werten ausgegangen werden, die erst im Bereich höherer LA-Koeffizienten ab 30 M.-% nicht mehr gegeben ist.

Nach [27] besteht bei der Prüfung von feinen Gesteinskörnungen 0/2 mm ein linearer Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Schlagversuchs an Sand und der Prallprüfung mit der Kugelmühle.

Nach einer umfangreichen Studie an zahlreichen Gesteinen [28] besteht zwischen dem MD-Verfahren und dem LA-Verfahren kein nachweisbarer Zusammenhang. Schwache Korrelationen wurden zwischen dem MD-Verfahren 0/2 nach NF P 18-572

[4] und dem LA-Verfahren festgestellt.

Laut [14] besteht keine Korrelation zwischen dem MD- und dem LA-Verfahren. Zu diesem Schluss kommt auch [12], wo Untersuchungen an 24 Gesteinskörnungen keinen Hinweis auf einen Zusammenhang lieferten.

Nach Beaty [15], der vergleichende Untersuchungen an Bettungsmaterial mit drei verschiedenen Verfahren durchgeführt hat, ist bekannt, dass das Dowson-Lilley-Verfahren und das Micro-Deval-Verfahren nach CSA A23.2-23A starke Korrelationen $> 0,99$ aufweisen. Seine Untersuchungen ergaben, dass die Beziehung zwischen dem Micro-Deval-Verfahren nach CSA A23.2-23A und dem Dowson-Lilley-Verfahren durch folgende Gleichung (2-6) beschrieben werden kann:

$$L = 1,97 + 1,21 \cdot M \quad (2-6)$$

mit $M =$ Micro-Deval (CSA), Abriebverlust (M.-%)

$L =$ Dowson und Lilley, Abriebverlust (M.-%)

Um eine bessere Vergleichbarkeit der drei Verfahren zu erreichen, wurden Anpassungen der ursprünglichen Vorgaben von Beaty vorgenommen.

Tabelle 2-1 enthält eine Übersicht über die wichtigsten Verfahren zur Bestimmung der Abriebfestigkeit und deren Eigenschaften.

Tabelle 2-1: Übersicht über die verschiedenen Verfahren

Verfahren und Prüfkörnung	Norm	Prinzip	Beanspruchung	Reibladung	Auswertung	Korrelation der Ergebnisse mit
Schlagzertrümmerungs-Versuch 8/12 mm	EN 1097-2	Schlaghammer	schlagend, zertrümmernd	-	mittlere Differenz der Durchgänge von mehreren Prüfsieben	Los Angeles-Verfahren
Micro-Deval-Verfahren 10/14 mm	EN 1097-1	Beanspruchung der Probe in rotierendem Zylinder mit Reibladung	primär reibend, mahlend	Stahlkugeln, Wasser	Ermittlung des Durchgangs durch ein festgelegtes Prüfsieb	keine Korrelation mit LA-Verfahren
Micro-Deval-Verfahren feine Gesteinskörnungen	NF P		reibend, mahlend	Stahlkugeln, Wasser		nicht bekannt
Micro-Deval-Verfahren feine Gesteinskörnungen	CSA		k. A.	Stahlkugeln, Wasser		Dowson und Lilley-Verfahren
Los Angeles-Verfahren 10/14 mm	EN 1097-2	rotierender Zylinder mit Mitnehmer, Reibladung	schlagend, reibend, mahlend	Stahlkugeln, trocken	Ermittlung des Durchgangs durch ein festgelegtes Prüfsieb	Schlagzertrümmerungs-Verfahren
Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle 0/2 mm	TP Min-StB	Beanspruchung der Probe in rotierendem Zylinder mit Reibladung	reibend, mahlend	Hartporzellan-kugeln, trocken	mittlere Differenz der Durchgänge von mehreren Prüfsieben	nicht bekannt
Verfahren nach Dowson und Lilley feine Gesteinskörnungen			reibend, mahlend	Stahlkugeln, trocken	Betrachtung Korngrößenverteilung, Vorgabe von Grenzwerten für Durchgang	Micro-Deval-Verfahren nach CSA

2.3 Bettungs- und Fugenmaterial

2.3.1 Die Pflasterbauweise

Aufbau

Nach den RStO [29] können die mit einer Pflasterdecke ausgeführten ungebundenen Aufbauten zur Befestigung von Verkehrsflächen bis zu einer der Bauklasse III entsprechenden Belastung eingesetzt werden. Der Oberbau besteht gemäß dem in Abbildung 2-3 dargestellten grundlegenden Aufbau aus einer oder mehreren Tragschichten. Bei der in der Regelbauweise hergestellten Decke ruhen die Pflastersteine i. d. R. in einer im verdichteten Zustand 3 bis 5 cm starken Bettung. Pflastersteine können aus Naturstein, Beton oder gebranntem Klinker bestehen und werden neben den klassischen Rechtecksteinen zwecks Steigerung der Verbundwirkung auch in weiteren Formen hergestellt.

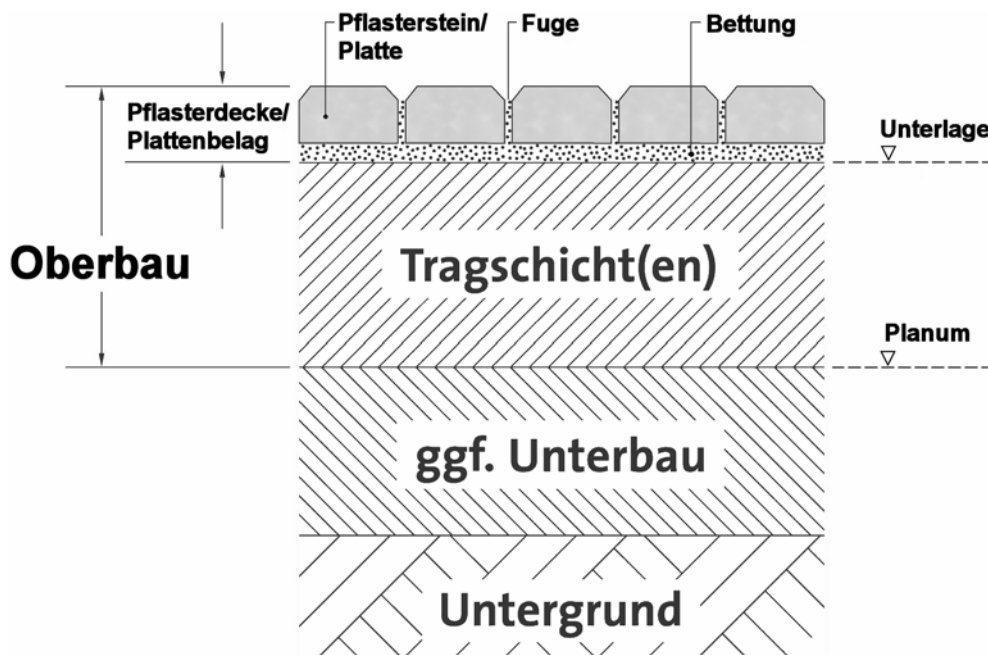


Abbildung 2-3: Bauweise mit Pflasterdecke nach ZTV Pflaster-StB [30]

Der Aufbau ist so zu gestalten, dass eine genügende Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit gewährleistet wird. Die durch die Überfahrt von Fahrzeugen verursachten vertikalen Lasten sind schadfrei in den Untergrund abzuleiten. Anfah- und Bremsvorgänge können zur Entwicklung von horizontalen Lasten führen, die einen genügenden Zusammenhalt der einzelnen Pflastersteine erfordern.

Durch die Fugen eindringendes Wasser ist in den Untergrund abzuleiten, weshalb auf eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit des gesamten Aufbaus Wert zu legen ist.

Bettung

Die Bettung dient vorrangig der Herstellung einer ebenen Pflasterdecke, indem variierende Steindicken ausgeglichen und in eingeschränktem Umfang Unebenheiten der Tragschicht geglättet werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Bettung nicht vorrangig als Ausgleichsschicht angewandt werden darf. Es sind lediglich nicht vermeidbare und durch den Herstellungsprozess bedingte Unebenheiten durch das Bettungsmaterial auszugleichen.

Das Bettungsmaterial sollte den unteren Teil der Fugen füllen, um einen Verbund zu den aneinander angrenzenden Steinen zu entwickeln [31]. Weitere Kriterien sind die ausreichende Wasserdurchlässigkeit und Filterstabilität zu angrenzenden Schichten sowie die ausreichende Frostbeständigkeit. Nach dem geltenden Regelwerk sind Anforderungen an die Korngrößenverteilung und die Größe der Korndurchmesser einzuhalten. So darf der Anteil an Körnungen $< 0,063$ mm bei Bettungsmaterial 5 M.-% im eingebauten Zustand nicht überschreiten. Das Bettungsmaterial weist üblicherweise einen Größtkorndurchmesser von 5 bis 8 mm auf und besteht meist aus gebrochenen, gut abgestuften Gemischen aus Gesteinskörnungen.

Fuge

Die Zwischenräume der Pflastersteine sind mit ungebundenem Fugenmaterial auszufüllen, um eine dauerhafte Kraftübertragung zwischen den einzelnen Steinen zu ermöglichen. Für den Einsatz als Fugenmaterial eignen sich gebrochene oder natürliche Gemischen aus Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn bis 5 oder 8 mm.

Für weitere Anforderungen und Angaben zur Ausführung wird auf die ZTV Pflaster-StB sowie entsprechendes untergeordnetes Regelwerk verwiesen.

2.3.2 Theoretischer Hintergrund: Kraftübertragung

Ein die Pflasterdecke überrollendes Fahrzeug verursacht vertikale und horizontale Kräfte sowie Schubkräfte. In der Reifenaufstandsfläche wirkt die aus der Gewichtskraft des Fahrzeuges resultierende vertikale Auflast. Zugleich kann unter Ausnutzung der zwischen Pflasterstein und Reifen bestehenden Reibung eine horizontale Beanspruchung auf die Decke übertragen werden. Als Maß für die Größe der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahndecke gilt der radiale oder tangential Kraftschlussbeiwert. Der Kraftschlussbeiwert kann bei trockener Fahrbahn und geringer Geschwindigkeit bis zu 0,7 oder 0,8 [-] betragen. Dies bedeutet, dass die Pflasterdecke durch ca. 80 % der Gewichtskraft des Fahrzeuges in Form von horizontalen Kräften beansprucht werden kann. Horizontale Kräfte sind verstärkt in Bereichen mit häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen, wie z. B. in der Nähe von

Kreuzungen oder Einmündungen, zu erwarten.

Die Übertragung der auftretenden horizontalen und vertikalen Kräfte H und G erfolgt entsprechend der in Abbildung 2-4 dargestellten Skizze. Die Normalkraft N_{vor} entspricht einer Vorspannung des Fugenmaterials, die nicht unmittelbar durch die Verkehrslasten verursacht wird, sondern durch Bewegungen der Steine bei behinderter Seitendehnung oder durch die Verdichtung der Decke während der Bau- oder Gebrauchsphase. Erst bei auftretenden Normalkräften kann in den Fugen ein Reibungswiderstand entstehen, von dem die Größe der Schubkräfte F_T am Stein abhängt. Die Schubkräfte sind zudem von dem Reibungsbeiwert μ zwischen Stein und Fuge und/oder dem Reibungswinkel φ des Fugenmaterials abhängig. Der Reibungswinkel φ wird maßgeblich, wenn der Bruch innerhalb der Fuge und nicht in der Grenzfläche zwischen Stein und Fuge auftritt. Dabei ist μ abhängig von dem Reibungswinkel φ , dem Wassergehalt des Bettungsmaterials sowie der Oberflächenstruktur des Pflastersteins.

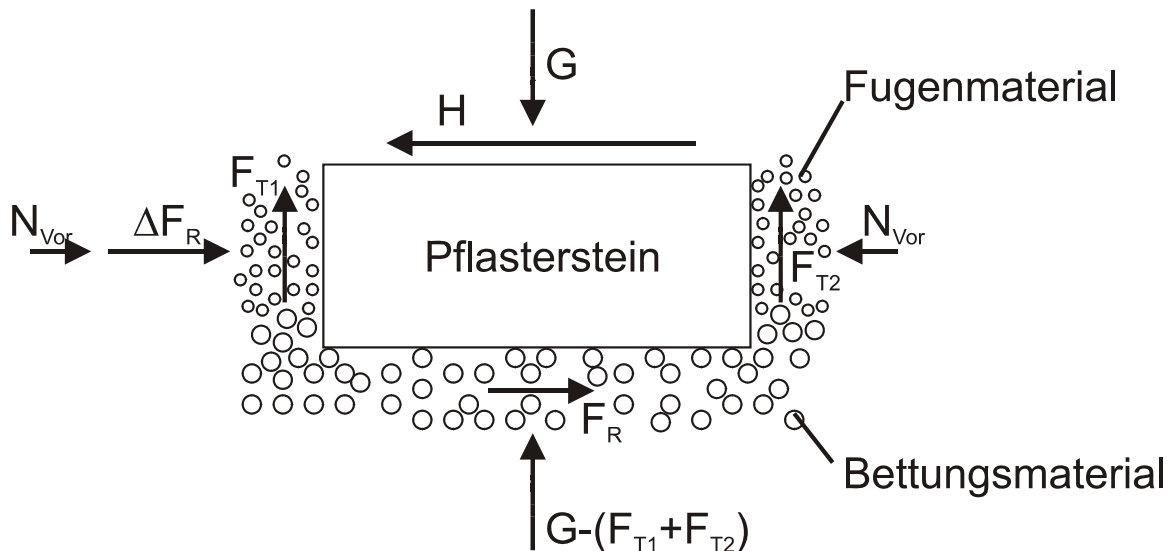


Abbildung 2-4: Prinzip der Kraftübertragung zwischen Pflasterstein, Fuge und Bettung

Im Fall, dass zwischen dem Pflasterstein und dem angrenzenden Bettungsmaterial der Zustand Gleiten auftritt, ergibt sich die Reibungskraft F_R zwischen Pflasterstein und Bettung aus den Schubkräften, der Auflast sowie dem Reibungsbeiwert μ oder Reibungswinkel φ . Aus den genannten Beziehungen lässt sich ableiten, dass sich die Größe der von der Fuge aufzunehmende Kraft ΔF_R aus dem Kraftschlussbeiwert, dem Reibungsbeiwert sowie der Auflast G ergibt. Aufgrund der aus mehreren kleinen Einzelementen bestehenden Struktur der Pflasterdecke treten kleinere Dreh-, Kipp- und Setz- sowie Verschiebungseffekte auf [32].

Die dargestellten Zusammenhänge zeigen, dass das Fugen- und Bettungsmaterial

bei der Überfahrt eines Fahrzeuges durch Scher- und Druckkräfte beansprucht wird, deren schadfreie Übertragung unmittelbar von den Materialeigenschaften der ungebunden Gemische aus Gesteinskörnungen abhängt. Der vom Korngemisch der Beanspruchung entgegen gesetzte Widerstand wird unter dem Begriff Scherfestigkeit zusammengefasst. Überschreiten die durch Verkehrslasten erzeugten statischen und dynamischen Beanspruchungen die Scherfestigkeit des Bettungs- und Fugenmaterials, kommt es neben der Umlagerung der Körner zur Kornzertrümmerung bzw. -verfeinerung. Die Kornverfeinerung kann in Form von Kantenabplatzungen, Brüchen an Schwachstellen einzelner Körner und Abrieb an der Kornoberfläche erfolgen. Bei Überschreitung bestimmter vom Fugen- oder Bettungsmaterial aufnehmbarer Lasten können Scherfugen zwischen den Pflastersteinen und dem umgebenden Material ausgebildet werden. Der Schervorgang ist durch eine Relativbewegung zwischen Pflasterstein und Fugen- oder Bettungsmaterial verbunden, die zum Abrieb der Körner im Grenzbereich führen kann.

Dabei gilt zu berücksichtigen, dass sich das Fugen- und Bettungsmaterial im oberen Bereich des Aufbaus befindet und eingeleitete Kräfte nur geringfügig durch eine Verteilung auf eine größere Fläche abgemindert werden.

2.3.3 Bedeutung des Bettungsmaterials bei der Schadensentwicklung

Aus der Gesamtheit der zum Thema Schäden an Pflasterflächen veröffentlichten Berichte zeichnet sich die vorherrschende Meinung ab, dass die Bedeutung des Bettungsmaterials unterschätzt wird und zu wenig Bemühungen unternommen wurden, um deren Einfluss auf die Entwicklung von Schäden zu ermitteln.

Shackel [33; 34] spricht dem Bettungsmaterial eine signifikante Bedeutung für die Stabilität der gesamten Konstruktion zu.

Nach [35; 36] beruht ein Anteil der Schäden bei spurfahrendem Verkehr und hohen Radlasten insbesondere bei feuchtem Klima auf unzureichenden Materialeigenschaften der Bettung. Es wird bemängelt, dass die Rolle des Bettungsmaterials lange vernachlässigt wurde und wenige Anforderungen an dessen Qualität gestellt wurden. Beaty [31] argumentiert, dass angesichts der Bedeutung eines qualitativ hochwertigen Bettungsmaterials höhere Kosten im Hinblick auf die für die Sanierung eines Schadensfalles anfallenden Kosten gerechtfertigt sind.

Knapton und Cook [37] schildern 1992 anhand einiger charakteristischer Schadensfälle die nach Auffassung der Verfasser unterschätzte Bedeutung des Bettungsmaterials. Knapton [38] betont 1993, dass nach seiner Kenntnis die Bettung das entscheidende Element bei der Entstehung von Schäden der Pflasterfläche darstellt.

Yaginuma und Kasahara [39] führen 1994 Untersuchungen zum Vergleich zweier verschiedener Bettungsmaterialien durch. Die Autoren stellen fest, dass die Eigenschaft des Bettungsmaterials einen maßgeblichen Einfluss auf die Beständigkeit der Pflasterkonstruktion hat.

2.3.4 Theorien zu dem Prozess der Schadensentwicklung

Ende der 1980er Jahre begann die systematische Untersuchung von Schäden an Pflasterflächen, deren Ursache in der Veränderung des Bettungsmaterials unter Verkehrsbelastung vermutet wurde. Verschiedene Theorien zur Erklärung der in der Bettungsschicht und dem restlichen Aufbau stattfindenden Prozesse wurden aufgestellt, wobei besonders die Arbeiten von Dowson hervorzuheben sind.

Aus Untersuchungen an belasteten Pflasterflächen mit Entnahme des Bettungsmaterials und anschließenden Laborversuchen entwickelte Dowson [40] 1994 seine Theorie zur Entwicklung von Schäden an Pflasterflächen weiter. So können laut Dowson die in der Bettung auftretenden Spannungen in Abhängigkeit von der Position des Kontaktpunktes auf dem Pflasterstein variieren. Dabei kann bei entsprechender Position der Reifenauflandsfläche die Last bis zum zehnfachen Betrag des Reifeninnendruckes anwachsen. Diese Spannungsspitzen führen zu einer Veränderung des Volumens des Bettungsmaterials, wodurch kleine Mengen an Wasser in die Bettung gelangen. Dieses Wasser kann die Feinanteile an die Oberfläche transportieren. Dieser Prozess wiederholt sich bis zur Entwicklung eines Schadens der Pflasterfläche.

Dowson [41] weist im Jahr 2000 mit Hilfe von Laborversuchen nach, dass in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Bettungsmaterials Feinanteile durch strömendes Wasser aus der Bettungsschicht ausgetragen werden können. Bei einem vergleichsweise geringen Wassergehalt $> 15 \text{ M.-%}$ besteht bereits die Möglichkeit, durch geringe Kräfte Wasser an die Oberfläche der Schicht zu bewegen. Der Autor folgert, dass die mit der Verringerung der Höhe der Bettung verbundene Verkleinerung des Porenraumes zu einer Verstärkung des beschriebenen Effektes beitragen kann. Dowson nimmt an, dass ein Teil des auf die Fläche aufgetragenen Wassers üblicherweise durch die Fugen in den Aufbau gelangt.

In anderen Fällen konnte der Transport von Feinanteilen innerhalb der Bettungsschicht nachgewiesen werden. Durch den Transport können nach Knapton [42] Hohlräume entstehen, die anschließend durch die Verkehrslasten zusammengedrückt werden. Dieser Vorgang konnte bei der Entstehung von Deformationen der Oberfläche und der Bildung von Spurrinnen nachgewiesen werden. Weitere Schäden, auch

die sog. „*Elephant Footprints*“, können nach [22] durch die Abwanderung von Feinstmaterial in die unter der Bettung liegenden Schichten begründet werden.

2.3.5 Schadensbild

Die schadhaften Flächen weisen nach [22] meist eine elliptische Form auf und werden als „*Elephant Footprints*“ bezeichnet. Dieses Schadensbild wurde bei mehreren Felduntersuchungen festgestellt. Die Untersuchung der Bettung zeigte, dass das Bettungsmaterial meist hart und stark verdichtet vorlag. Im Bereich der Steinränder wurden Verfärbungen des Bettungsmaterials festgestellt, so dass sich ein Muster auf der Oberfläche der Bettung ergab. Ein Vergleich der Korngrößenverteilungen der Bettungsmaterialien aus belasteten und unbelasteten Bereichen ergab einen deutlich höheren Anteil an sehr feinen Körnungen in den belasteten Bereichen.

1993 nennt Dowson [43] einheitliche Merkmale von Schäden an Pflasterflächen, die auf Mängel des Bettungsmaterials zurückzuführen sind. Auf der Oberseite der Pflastersteine befinden sich nach Angaben des Autors schlammartige Verfärbungen (*mud like staining*). Weitere Setzungen befinden sich neben der ausgetragenen Schlämme in einem Umkreis von einem halben Meter.

Die Entstehung von Feinkorn bei Pflasterflächen wurde von Knapton [42] 1994 in mehreren Fällen dokumentiert. Der Autor schildert, wie sich im Bereich der Fahrspur eine „cremige dünnflüssige Schlämme“ auf der Oberfläche ansammelte. Die Schlämme trat zuvor aus den Fugen aus. Eine Analyse unter dem Elektronenmikroskop ergab, dass der feste Bestandteil der Schlämme aus Partikeln mit einem Durchmesser zwischen 1 und 10 μm bestand. Knapton schreibt der Schlämme eine Wirkung ähnlich der eines Schmieröls zu, die zu einer Verminderung der Beständigkeit des Aufbaus führe.

2.3.6 Ursachen von Schäden bei Versagen der Bettung

- Verkehrsbelastung

Dowson und Lilley [22] erläutern 1988, dass Schäden in Form von Setzungen der Pflastersteine auf eine durch hohe, wiederkehrende Verkehrslasten (hier: spurfahrender Busverkehr) entstehende Zerkleinerung des Bettungsmaterials zurückgeführt werden können. Die von Cook und Knapton [37] untersuchte Veränderung des Bettungsmaterials wurde bei Flächen mit hoher spurgeführter Verkehrsbelastung festgestellt. Knapton [42] erläutert, dass Schäden aufgrund der Veränderung des Bettungsmaterials vornehmlich bei spurfahrendem Verkehr an Bushaltestellen auftreten.

- Wassergehalt der Bettung

In [44] erläutert Dowson 1996 den Einfluss des Wassers auf die Schadensentwicklung. Untersuchungen mit dem Kugelmühlen-Verfahren von Dowson und Lilley haben gezeigt, dass die Durchführung des Verfahrens unter Zugabe von Wasser zu einer erhöhten Zerkleinerung führt. Demnach ist nach [44] der Rolle des Wassers besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Nach [44] gelangen zwischen 10 bis 30 % des auf die Pflasterdecke auftreffenden Wassers über die Fugen in den Aufbau gelangen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass durch den Eintrag von Fremdmaterial die Fugen vollständig mit der Zeit verschlossen werden.

Nach [37] stellt das Vorkommen von Wasser in der Bettung eine mögliche Ursache für die Entstehung von Schäden dar. Knapton [37] kommt zu der Erkenntnis, dass das Versagen des Bettungsmaterials bei hoch belasteten Pflasterflächen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Vorhandensein von Wasser steht.

- mangelnder Abriebwiderstand

Dowson [22] kommt 1988 zu dem Schluss, dass die Korngrößenverteilung und die Kornform in Hinblick auf die Entstehung von Kornzerkleinerung von sekundärem Belang sind, wogegen die Härte der Körner den wesentlichen Einflussfaktor darstellt.

Neben anderen Faktoren ist nach Beaty [35] ein ausreichender Abriebwiderstand bedeutend für die Beständigkeit der Pflasterbefestigung. Im Weiteren wurden Untersuchungen mit Bettungsmaterialien durchgeführt, die auf der dynamischen Belastung von bewässerten Proben beruhen. Hiernach haben der Widerstand gegen mechanischen Abrieb und der Anteil an Feinkorn eine größere Bedeutung als die Kantigkeit der Körner. Dabei scheint nach Ansicht von Beaty [36] der Einfluss des Widerstandes gegen Zerkleinerung auf die Schadensanfälligkeit bedeutender zu sein als der Einfluss der Kornform und des Reibungswinkels.

Der Widerstand von Gesteinskörnungen gegen Zerkleinerung kann nach Cook und Knapton [37] zur Entwicklung von Schäden beitragen.

Knapton [42] fasst die wesentlichen Faktoren zusammen, die bei Versagensfällen von Schäden festgestellt wurden:

- Feine Gesteinskörnungen, die durch Abrieb oder Zertrümmerung entstanden sind, und einen Anteil von 3 M.-% an Feinkorn $< 75 \mu\text{m}$ aufweisen
- Spurfahrender Verkehr, üblicherweise Busse
- In der Bettungsschicht befindliches (stehendes) Wasser

Zur Häufigkeit von Schäden, die auf das Bettungsmaterial zurückgeführt werden können, zitiert Dowson [43] eine Umfrage zu Schadensfällen an Bushaltestellen. Diese besagt, dass ein Großteil der Schäden auf Eigenheiten des Untergrundes und Ausführungsmängel zurückgeführt werden kann, wogegen nur bei einem kleinen Teil der Schäden der unzureichende Abriebwiderstand des Bettungsmaterials ursächlich war.

- sonstige Ursachen

Neben der Abriebbeständigkeit werden folgende weitere mögliche Ursachen für die Entstehung von Schäden, die ihren Ursprung in der Bettung haben, genannt:

- die Dicke der Bettung
- die Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials
- den Anteil an Feinkorn
- die Kornform
- die Scherfestigkeit des Bettungsmaterials
- der Wassergehalt des Bettungsmaterials
- der Verband
- die Steindicke
- Verdichtungsvorgänge und Bewegungen innerhalb der Bettungsschicht
- die Mineralogie der Gesteinskörnungen
- der Quarzanteil [42]
- die Oberflächenstruktur des Einzelkorns [38]

Kurth [45] spricht sich gegen die Annahme aus, dass die Kornverfeinerung generell ursächlich für die Entstehung von Schäden an Pflasterflächen sei. Das Versagen eines Bettungsmaterials 2/5 mm werde nach Aussage des Autors häufig damit erklärt, dass das Material zerrieben worden sei, wodurch sich Feinkorn angesammelt habe und eine Gleitschicht entstanden ist. Genauere Untersuchungen widerlegten diese Aussage: Das Fugenmaterial war nach Meinung des Verfassers nicht auf das Bettungsmaterial abgestimmt worden, wodurch es in die Bettung eingetragen wurde und die damit verbundene Fugenentleerung zu einer Verschiebung des Belages führte.

2.3.7 Empfehlungen für Anforderungen und Prüfverfahren

Die nach [22] primäre Bedeutung der Kornfestigkeit führte zur Entwicklung des *Bottle Rolling Test* (s. Kapitel 2.2.5). Als Gründe für die Wahl der Kugelmühle zur Bean-

spruchung des Materials nennt der Autor die einfache Handhabung, die gute Wiederholbarkeit und den geringen Zeitaufwand.

Dowson [40] unterstreicht 1994 die bedeutende Rolle der Kornfestigkeit des Bettungsmaterials und empfiehlt die Durchführung des Kugelmühlen-Verfahrens nach Dowson und Lilley. Er räumt [43] 1993 jedoch ein, dass der *Bottle Rolling Test* nur ein Teilstück bei der Beantwortung der Frage nach der Eignung eines Materials darstellt.

Dowson erläutert 1996 in [44] die Festlegung der Obergrenzen für die Siebdurchgänge nach Beanspruchung mit dem Kugelmühlenverfahren. Von einer stark belasteten Bushaltestelle in Pflasterbauweise in London, die nach 17 Jahren keine Schäden aufwies, wurden Proben vom Bettungsmaterial entnommen. Anhand der bei diesen Proben ermittelten Zunahmen bei der Durchführung des Kugelmühlen-Verfahrens wurden die Obergrenzen für ein für hohe Verkehrsbelastungen geeignetes Bettungsmaterial festgelegt.

Beaty spricht sich 1992 angesichts des Auftretens von Schäden an Flächen unter hohen Verkehrslasten für umfassendere Anforderungen an das Bettungsmaterial aus [31]. Die üblichen Anforderungen an die Dicke der Bettungsschicht, die Korngrößenverteilung sowie die Kornform und den Wassergehalt während Einbau und im Gebrauch sollen nach Meinung des Verfassers um die Härte der Körner (*sand minerals*) ergänzt werden.

Im Jahr 1996 folgert Beaty [15] aus dem Vergleich dreier Verfahren zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Bettungsmaterialien, dass der Attrition-Test (s. Kapitel 2.2.6) am ehesten den Bedingungen des eingebauten Bettungsmaterials unter Verkehrslast entspricht. Da die weiteren Verfahren unter Verwendung von Reibbläuden jedoch übereinstimmende Einstufungen der untersuchten Materialien erzielen würden, sei deren Einsatz im Hinblick auf die deutlich geringere Dauer der Prüfung gerechtfertigt.

Die Prüfung der Abriebfestigkeit kann nach Beaty [35] mit dem Verfahren nach Dowson und Lilley erfolgen, wobei bestimmte Anforderungen an die Kornverfeinerung eingehalten werden sollen.

Knapton schließt sich der Meinung von Dowson hinsichtlich der Abriebfestigkeit und der Verwendung des *bottle rolling test* an. Er beurteilt die gängigen Anforderungen hinsichtlich Korngrößenverteilung und Ursprung der Gesteinskörnungen (natürlich/gebrochen) als unzureichend für Anwendungen, die durch hohe Verkehrslasten, vorwiegend spurfahrendem Verkehr und dem Vorhandensein von Wasser im Aufbau

gekennzeichnet sind [38]. Knapton hält den *bottle rolling test* 1994 für aussagekräftig und empfiehlt ihn zur Überprüfung der Eignung von Bettungsmaterial bei den o. g. hohen Verkehrslasten, insbesondere spurfahrenden Busverkehr. Zudem untersucht Knapton den Einfluss der Oberflächenstruktur und empfiehlt den Einsatz eines Elektronenmikroskopes bei der Prüfung von Bettungsmaterialien [42].

In dem vom ICPI herausgegebenen „Tech Spec No. 17“ [16] wird 2007 auf Grundlage der Annahmen von Dowson und Lilley eine klare Unterscheidung zwischen gewöhnlichen und hoch belasteten Pflasterflächen vorgenommen. Als hoch belastete Flächen gelten Straßen, bei denen die äquivalenten Einzelachslastübergänge (80 kN) mehr als 1,5 Millionen während der Lebensdauer betragen, Achslasten von mehr als 11.000 kg oder Fahrzeuglasten von 22.680 kg vorliegen. Für Pflasterflächen, die zur Gruppe der hoch belasteten Verkehrsflächen gehören, werden besondere Anforderungen an das Bettungsmaterial formuliert. So wird z. B. auf das Dowson und Lilley-Verfahren in den ICPI Handbüchern „*Port and industrial Pavement Design with Concrete Pavers*“ (ICPI 1997) und „*Airfield Pavement Design with Concrete Pavers*“ (1995) hingewiesen.

Das „Tech Spec No. 17“ [16] spricht sich für die primäre Verwendung des nach den Vorgaben des nach [17] durchgeführten Micro-Deval-Verfahrens an feinen Gesteinskörnungen zur Bestimmung der Abriebfestigkeit von Bettungsmaterial aus. Der Magnesium-Sulfat oder der Natrium-Sulfat-Test sollen laut [17] nur alternativ angewandt werden.

Das Micro-Deval-Verfahren entwickle sich laut [16] zur vorherrschenden Prüfmethode für Bettungsmaterial in Nord Amerika. So soll von der *American Society for Testing of Materials (ASTM)* und der *American Association of State Highway Transportation Officials* neben dem bereits bestehenden Micro-Deval-Verfahren für grobe Gesteinskörnungen die Aufnahme des Verfahrens für feine Gesteinskörnungen nach [17] erörtert werden.

Nach [16] werden primäre und sekundäre Anforderungen an Bettungsmaterial für hoch belastete Pflasterflächen aufgestellt. Zu den primären Eigenschaften eines Bettungsmaterials zählt neben der Wasserdurchlässigkeit und dem Anteil an Feinanteilen (max. Durchgang durch 0,075- oder 0,080-mm-Prüfsieb: 1 M.-%) der mit dem Micro-Deval-Verfahren nach [17] an feinen Gesteinskörnungen bestimmte Abriebwert. In [16] wird die Einhaltung eines Abriebwertes von 8 M.-% (prozentualer Durchgang durch ein 0,08-mm-Sieb) empfohlen. Als sekundäre Eigenschaften gelten laut [16] die Beständigkeit gegenüber Magnesium-Sulfat und Natrium-Sulfat, der Quarz und Quarzanteil sowie die Kornform.

2.3.8 Anforderungen an die Festigkeit von Bettungs- und Fugenmaterial

Regelwerk in Deutschland

Hinsichtlich der mechanischen Festigkeit von Bettungs- und Fugenmaterial besagt das **M FP 1** [46]: „Durch dynamische Beanspruchungen können sich bei Gemischen aus Gesteinskörnungen mit geringer Festigkeit Feinanteile in der Bettung bilden. Hierdurch nimmt die Wasserdurchlässigkeit der Bettung ab und die Schadensanfälligkeit der Decke zu.“ Daraus wird folgende Empfehlung abgeleitet: „Für befahrene Verkehrsflächen sollten daher Gemische aus Gesteinskörnungen verwendet werden, mit denen ausreichend positive Langzeiterfahrungen bei vergleichbarer Beanspruchung vorliegen. Gesteinskörnungen mit einem hohen Widerstand gegen Kornzertrümmerung und Abrieb sind geeignet. Empfehlungen für Grenzwerte für Sande und Sand-Splitt-Gemische können derzeit aufgrund fehlender Erkenntnisse nicht gegeben werden.“

Die **TL Gestein-StB 04** setzen u. a. die Europäische Norm DIN EN 13242 „Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau“ in Deutschland um und enthalten Anforderungen an die Eigenschaften von Gesteinskörnungen, welche vom jeweiligen Verwendungszweck abhängig sind. So werden im Anhang H für den Bau von Pflasterdecken und Pflasterbelägen Anforderungen an den Widerstand gegen Zertrümmerung gestellt. Bettungs- und Fugenmaterial aus natürlichen, industriell hergestellten oder rezyklierten Gesteinskörnungen sollen einen SZ-Wert der Kategorie SZ₁₈ bis SZ₂₆, entsprechend einem LA-Koeffizienten der Kategorie LA₂₀ bis LA₃₀, aufweisen.

Die **TL Pflaster-StB 06** [47] verweisen in Hinblick auf die Festigkeit der Gesteinskörnungen für Bettungen und Fugen auf die in den TL Gestein-StB genannten Anforderungen.

Die **ZTV Pflaster-StB 06** besagen „Es ist ein Bettungsmaterial zu verwenden, das aufgrund seiner Materialeigenschaften ausreichende Festigkeiten aufweist.“ Diese Aussage wird im Weiteren näher konkretisiert: Gesteinskörnungen, die für Bettungen bei höher belasteten Verkehrsflächen der Bauklasse III und IV nach den RStO 01 eingesetzt werden, sollen hinsichtlich des Schlagzertrümmerungswertes mindestens der Kategorie SZ₂₂ (LA₂₅) gemäß den TL Gestein-StB entsprechen. Die Anforderungen an den Schlagzertrümmerungswert werden für Verkehrsflächen mit besonders hohen Beanspruchungen, wie z. B. spurfahrendem Verkehr, häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgängen (RStO 01, Abschnitt 2.9), verschärft. Hier wird ein SZ-Wert (LA-Koeffizient) gefordert, der mindestens der Kategorie SZ₁₈ (LA₂₀) entspricht. Fugenmaterialien sind hinsichtlich der mechanischen Festigkeit nicht durch Anforderungen in den ZTV Pflaster-StB 06 eingeschränkt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Anforderungen an den LA-Koeffizienten oder alternativ den Schlagzertrümmerungswert von Bettungsmaterial im europäischen Regelwerk enthalten sind. Der LA-Koeffizient und der SZ-Wert werden an Gesteinskörnungen der Kornklasse 10/14 mm ermittelt. Diese Kornklasse entspricht jedoch nicht den üblicherweise für Bettungen verwendeten Kornklassen 0/2 mm, 0/5 mm oder 0/8 mm (0/11 mm). Demnach besteht die Gefahr, dass minderfeste Gesteinskörnungen als Bettungsmaterial verwendet werden, da die Eigenschaften eines Gesteins in Abhängigkeit von der betrachteten Korngruppe variieren können.

3 Prüfung des Widerstandes gegen mechanische Beanspruchung

3.1 Auswahl und Beschaffung der Proben

Gesteinsarten, Herkunft

In Laboruntersuchungen sollen zwanzig repräsentative gebrochene Korngemische 0/5 mm untersucht werden, die als Bettungs- und Fugenmaterialien üblicherweise eingesetzt werden. Dazu kommen RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte. Als Vergleichsmaterialien dienen drei Natursande.

Tabelle 3-1: Auswahl der Gesteinskörnungen

Nr.:	Kurzbezeichnung	Langbezeichnung	Gesteinsart	Bundesland
1	K 1	Kalkstein 1	dolomitischer Kalkstein	Bayern
2	K 2	Kalkstein 2	Kalkstein	Bayern
3	K 3	Kalkstein 3	Kalkstein	Nordrhein-Westfalen
4	K 4	Kalkstein 4	Kalkstein	Nordrhein-Westfalen
5	GW 5	Grauwacke 5	Grauwacke	Nordrhein-Westfalen
6	GW 6	Grauwacke 6	Grauwacke	Sachsen
7	GW 7	Grauwacke 7	Grauwacke	Nordrhein-Westfalen
8	D 8	Diabas 8	Diabas	Nordrhein-Westfalen
9	D 9	Diabas 9	Diabas	Hessen
10	B 10	Basalt 10	Basalt	Rheinland-Pfalz
11	B 11	Basalt 11	Basalt	Nordrhein-Westfalen
12	GR 12	Granit 12	Granit	Bayern
13	GR 13	Granit 13	Granit	Thüringen
14	RHY 14	Rhyolith 14	Rhyolith	Baden-Württemberg
15	RHY 15	Rhyolith 15	Rhyolith	Rheinland-Pfalz
16	Q 16	Quarzit 16	Quarzit	Rheinland-Pfalz
17	Q 17	Quarzit 17	Quarzit	Hessen
18	GN 18	Gneis 18	Gneis	Sachsen
19	OGN 19	Orthogneis 19	Orthogneis	Baden-Württemberg
20	BS 20	Basanit 20	Basanit	Rheinland-Pfalz
21	RCTL 21	RC (TL-Gest.) 21	Gemisch aus RCZ 22 und RCB 23	-
22	RCZ 22	RC-Baustoff Ziegel 22	RC-Baustoff Ziegel	Hessen
23	RCB 23	RC-Baustoff Beton 23	RC-Baustoff Beton	Nordrhein-Westfalen
24	SKG 24	SKG 24	Schmelzkammergranulat (aufbereitet)	Nordrhein-Westfalen
25	HS 25	Hüttensand 25	Hüttensand	Nordrhein-Westfalen
26	LDS 26	LD-Schlacke 26	LD-Schlacke	Nordrhein-Westfalen
27	NS 27	Natursand 27	Natursand	Nordrhein-Westfalen
28	NS 28	Natursand 28	Natursand	Nordrhein-Westfalen
29	NS 29	Natursand 29	Natursand	Mecklenburg-Vorpommern

Natürliche Gesteinskörnungen

Die getroffene Auswahl berücksichtigt die verschiedenen im Straßenbau eingesetzte Gesteinsarten und unterschiedliche Gewinnungsstätten in Deutschland. Bei gleicher Gesteinsart weisen diese Gesteine nach Möglichkeit unterschiedliche Festigkeiten auf. Die Beurteilung der Festigkeit der Gesteinskörnungen erfolgte anhand des $SZ_{8/12}$ -Wertes, der den angeforderten Prüfzeugnissen aus der Fremdüberwachung nach RG Min-StB [48] entnommen wurde. Es wurden jeweils die Korngruppen 0/2 mm, 2/5 mm, 8/11 mm und 11/16 mm beschafft.

RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte

Die Gruppe der RC-Baustoffe besteht aus einem reinen rezyklierten Ziegel (RCZ 22) und einem reinen rezyklierten Beton (RCB 23). Dazu soll ein Gemisch aus RC-Baustoffen untersucht werden, das den Anforderungen der TL Gestein-StB entspricht. Hiernach darf der Anteil > 4 mm an Ziegel 30 M.-% nicht überschreiten. Gewählt wurde eine Mischung der RC-Baustoffe RCZ 22 und RCB 23 im Verhältnis 30 zu 70 M.-%.

Zunächst war nicht aufbereitetes Schmelzkammergranulat für die Untersuchungen vorgesehen, wurde aber aufgrund der fehlenden Eignung als Bettungs- oder Fugenmaterial aus dem Untersuchungsprogramm genommen. Das durch Prallspaltung aufbereitete Schmelzkammergranulat (SKG 24) liegt als Korngruppe mit einem Größtkorndurchmesser von 4 mm vor.

Hüttensand und Stahlwerksschlacke fielen bei der Produktion eines Stahlherstellers in Nordrhein-Westfalen an.

3.2 Voruntersuchungen (Rohdichte, Korngrößenverteilung)

3.2.1 Versuchsbeschreibung / Ergebnisse

Die Bestimmung der Trockenrohddichte ρ_p der Körnungen 0/2 mm erfolgte nach der EN 1097-6 [49] an der Forschungsstelle 1 (kurz: FS 1). Es wurde das in Anhang A.4.4 der [49] beschriebene Pyknometer-Verfahren für Gesteinskörnungen von 0,063 bis 31,5 mm verwendet.

An der Forschungsstelle 2 (kurz: FS 2) wurde die scheinbare Rohddichte ρ_a für die Gesteinskörnungen 8/16 nach EN 1097-6, Abschnitt 8, bestimmt.

In Tabelle 3-2 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Rohdichten dargestellt.

Tabelle 3-2: Rohdichte der untersuchten Materialien in Abhängigkeit von den Körnungen

Material	ρ_P [g/cm ³]	ρ [g/cm ³]	ρ_a [g/cm ³]
	0/2 mm	2/5 mm	8/16 mm
K 1	2,760	2,717	2,747
K 2	2,699	2,684	2,687
K 3	2,711	2,708	2,705
K 4	2,675	2,709	2,707
GW 5	2,686	2,715	2,716
GW 6	2,715	2,720	2,735
GW 7	2,732	2,722	2,726
D 8	2,827	2,862	2,865
D 9	2,796	2,739	2,859
B 10	2,724	2,866	2,875
B 11	3,074	3,070	3,020
GR 12	2,717	2,636	2,643
GR 13	2,693	2,636	2,652
RHY 14	2,639	2,621	2,636
RHY 15	2,597	2,554	2,575
Q 16	2,653	2,658	2,661
Q 17	2,709	2,651	2,660
GN 18	2,777	2,735	2,757
OGN 19	2,735	2,706	2,719
BS 20	3,150	3,045	3,055
RCTL 21	2,524	2,533	-
RCZ 22	2,684	2,489	-
RCB 23	2,461	2,553	2,626
SKG 24	2,590	2,537	-
HS 25	3,447	-	-
LDS 26	2,637	3,505	-
NS 27	2,671	2,644	2,645
NS 28	2,651	2621	2,627
NS 29	2,760	2,669	2,679

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte an den Forschungsstellen mit unterschiedlichen Verfahren. An der FS 1 wurde die Absiebung der Feinanteile < 0,063 mm mit Hilfe der Luftstrahlsiebung durchgeführt, an der FS 2 wurden diese ausgewaschen. Um den Einfluss der verschiedenen Verfahren und verwendeten Siebe einschätzen zu können, wurde vor Anlauf der Untersuchungen eine Vergleichssiebung an beiden Forschungsstellen durchgeführt. Die Ergebnisse wiesen eine zufrieden stellende Übereinstimmung auf.

3.3 Micro-Deval-, Los Angeles- und Schlagzertrümmerungs-Verfahren an den groben Gesteinskörnungen

3.3.1 Versuchsbeschreibung

Die Bestimmung des Micro-Deval-Koeffizienten und des Los Angeles-Koeffizienten erfolgte gemäß DIN EN 1097-1 und -2 an den Gesteinskörnungen, die bis zu einem Größtkorn von 14 mm vorlagen. Dementsprechend konnte die Prüfung nicht an rezykliertem Ziegel, Hüttensand und Schmelzkammergranulat durchgeführt werden. Die Prüfung der zu den Natursanden gehörenden gröberen Kiese wurde als ergänzender Arbeitsschritt veranlasst.

Die beiden Verfahren wurden streng nach den Vorgaben der DIN EN 1097 durchgeführt. Gemäß DIN EN 1097-2, Abschnitt 5.2, soll die Korngrößenverteilung der Messprobe einer von zwei aufgeführten Anforderungen entsprechen. Hier wurde sich einheitlich für die Verwendung des 11,2-mm-Analysensiebes und eines Durchgangs durch dieses Sieb von 35 M.-% entschieden. Dies entspricht Anforderung b) der Norm. Je Material wurden zwei Prüfungen durchgeführt und die Einzelwerte anschließend gemittelt. Eine ausführliche Beschreibung der Verfahren ist in Kapitel 2 enthalten.

Die eigenständige Bestimmung des Schlagzertrümmerungswert 8/12 mm war nicht vorgesehen. Der SZ-Wert wurde den von den Herstellern angeforderten Prüfzeugnissen aus der Fremdüberwachung entnommen und diente vorrangig der Auswahl der Materialien und als Anhaltspunkt für weitere Interpretationen der Ergebnisse.

Um übliche Schwankungen der Festigkeit bei der Gewinnung der natürlichen Gesteinskörnungen auszugleichen, wurden je Gestein insgesamt vier Prüfzeugnisse angefordert. Ausnahmen stellen der Basanit 20, für den nur ein Zeugnis vorlag, sowie der RC-Beton dar, der nicht auf Schlagfestigkeit untersucht wurde.

3.3.2 Versuchsergebnisse

3.3.2.1 Micro-Deval-Verfahren (10/14 mm)

Das Micro-Deval-Verfahren wurde je Gesteinskörnung an zwei Einzelproben durchgeführt. Dabei konnte eine geringe Streuung der Einzelwerte festgestellt werden. Die mittlere Abweichung beträgt 0,7 M.-%. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang, Teil C aufgeführt.

In Abbildung 3-1 sind die Micro-Deval-Koeffizienten der untersuchten Gesteinskörnungen als Mittelwert aus zwei Einzelprüfungen dargestellt. Die Werte liegen in einem Bereich von 5,5 bis 27,8 M.-%, wobei das arithmetische Mittel aller Werte

12,9 M.-% beträgt.

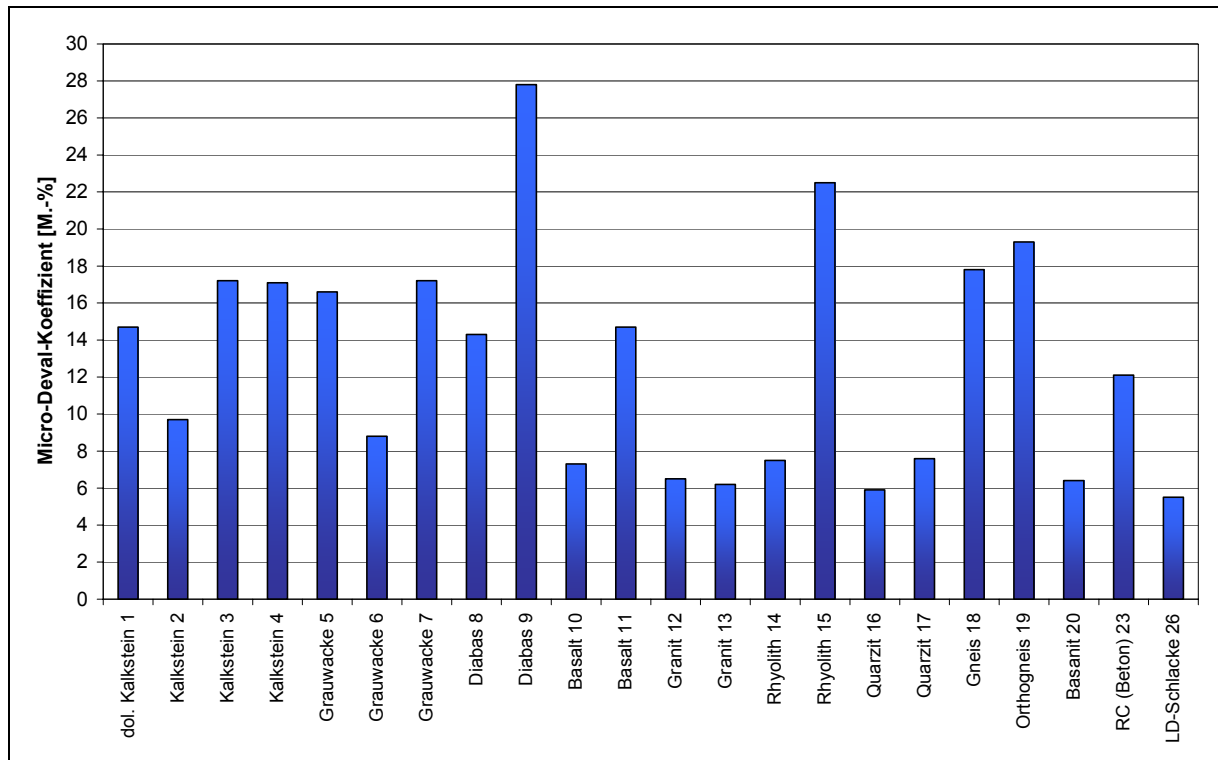


Abbildung 3-1: Micro-Deval-Koeffizienten, Prüfkörnung 10/14 mm

Die Koeffizienten der Kalksteine liegen mit Ausnahme des Kalksteins 2 in der schmalen Spanne zwischen 14,5 und 17 M.-%. Kalkstein 2 weist einen deutlich geringen Wert unter 10 M.-% auf. Ein entsprechendes Bild zeigen die Grauwacken: Die Koeffizienten der Grauwacken 5 und 7 betragen etwa 17 M.-%, wogegen die Grauwacke 6 einen vergleichsweise geringen Wert von 8,8 M.-% aufweist. Der Koeffizient des Diabas 8 befindet sich mit 14,3 M.-% deutlich unter dem insgesamt höchsten Wert von nahezu 28 M.-% des Diabas 9.

Sehr geringe Spreizungen der Werte finden sich bei den Graniten, deren Koeffizienten nur um 0,3 M.-% voneinander abweichen. Ähnlich verhalten sich die beiden Quarzite 16 und 17 sowie die Gneise 18 und 19, welche eher geringe Abweichungen aufweisen.

Die in Abbildung 3-2 dargestellte Reihung der Gesteinskörnungen zeigt, dass eine Einordnung in Klassen mit geringen Koeffizienten ≤ 8 M.-%, mit mittleren Koeffizienten zwischen 12 und 17 M.-% als auch mit hohen Werten > 18 M.-% möglich ist. Niedrige Koeffizienten entsprechen einer hohen mechanischen Festigkeit.

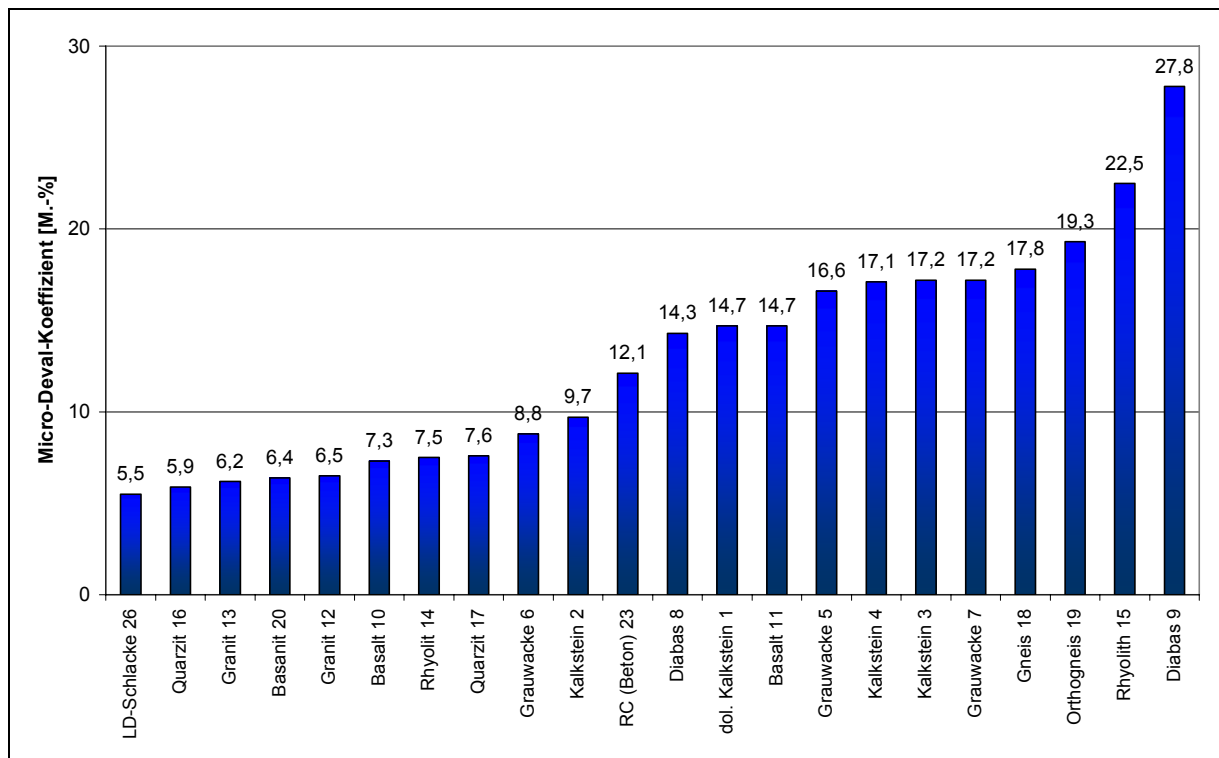


Abbildung 3-2: Reihung der Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Micro-Deval-Koeffizienten

Zu der Gruppe der natürlichen Gesteinskörnungen mit geringen Koeffizienten gehören die Granite, welche sich durch vergleichsweise geringe Werte < 7 M.-% hervorheben. Der Quarzit 16 weist den geringsten Koeffizienten der natürlichen Gesteinskörnungen auf, auch der Koeffizient des Quarzites 17, Basanit 20, Basalt 10 sowie Rhyolit 14 können als gering eingeordnet werden.

Die Grauwacken und die Kalksteine weisen mittlere bis geringe Werte zwischen 9 und 17 M.-% auf. Die untersuchten Diabase befinden sich in den Gruppen mittlerer und hoher Koeffizienten, wobei der Diabas 9 mit einem Koeffizienten von 27,8 M.-% deutlich über den anderen Werten liegt. Vergleichsweise hohe Werte wurden bei den Gneisen 18 und 19 wie auch bei dem Rhyolit 15 festgestellt.

Der als feinkörnig geltende Diabas weist mittlere bis hohe Koeffizienten auf, wogegen die grobkörnigen Granite zu der Gruppe der Gesteine mit sehr geringen Koeffizienten zählen.

Der Koeffizient der zu den industriellen Nebenprodukten zählenden LD-Schlacke stellt mit 5,5 M.-% den insgesamt geringsten Wert dar. Der Koeffizient des RC-Betons liegt mit 12,1 M.-% in der Gruppe mit mittleren Werten.

3.3.2.2 Los Angeles-Verfahren (10/14 mm)

Je Gesteinskörnung wurde der Los Angeles-Koeffizient an zwei Einzelproben bestimmt. Die im Anhang, Teil C aufgeführten Werte zeigen eine vergleichsweise geringe Streuung der Einzelwerte. Das arithmetische Mittel aller Abweichungen zwischen den zwei Einzelwerten beträgt 0,4 M.-%.

Abbildung 3-3 zeigt die Los Angeles-Koeffizienten der untersuchten Gesteinskörnungen als Mittelwert aus zwei Einzelprüfungen. Die Werte liegen in einem Bereich zwischen 9,7 M.-% (Diabas 8) und 36,7 M.-% (RC-Beton 23), wobei ein geringer Wert für eine hohe mechanische Festigkeit steht. Das arithmetische Mittel der dargestellten Koeffizienten beträgt 17,5 M.-%.

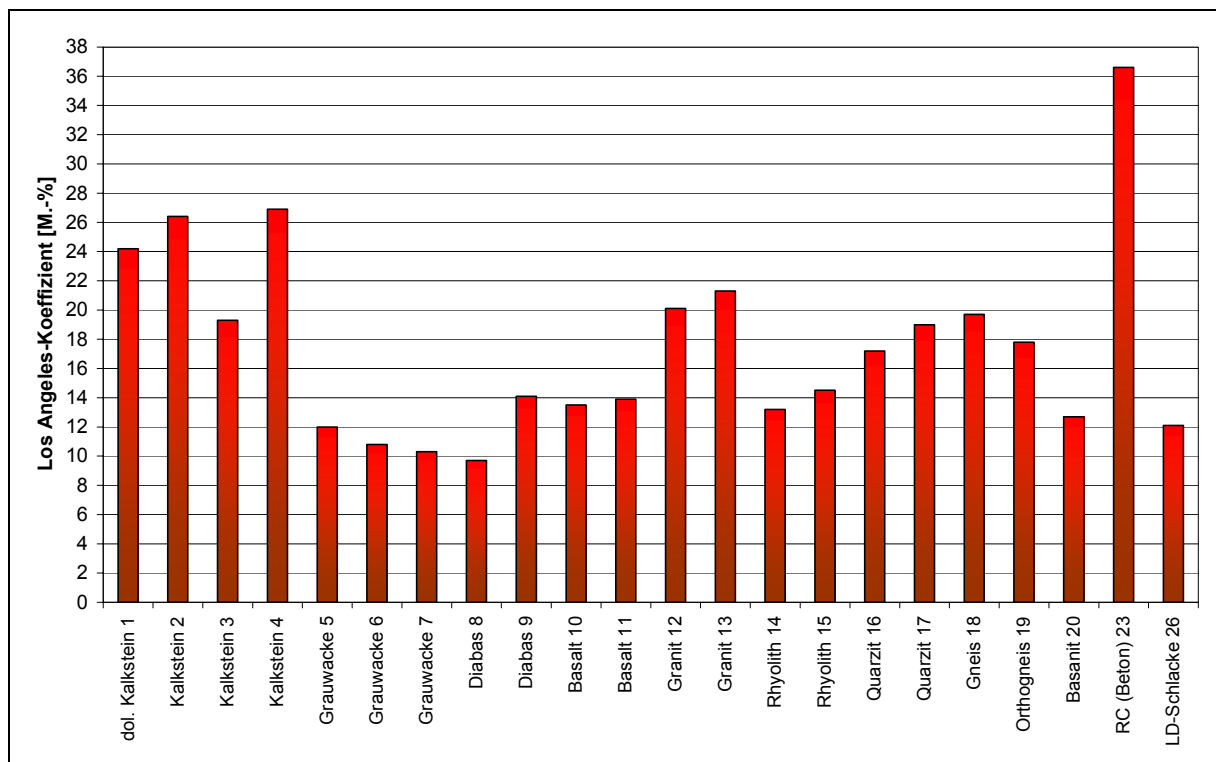


Abbildung 3-3: Los Angeles-Koeffizienten, Prüfkörnung 10/14 mm

Die Koeffizienten der untersuchten Kalksteine zeigen entsprechend des Micro-Deval-Verfahrens mit Ausnahme eines Kalksteins eine geringe Spanne. Im Unterschied zum MD-Verfahren liegt der Koeffizient des Kalksteins 3 unter den anderen Werten.

Bei den Grauwacken 5 bis 7 kann abgesehen von einer leichten Abnahme der Werte keine deutliche Differenzierung festgestellt werden. Weiterhin ergaben die Untersuchungen geringe Spannen bei den Basalten, den Graniten, den Rhyoliten, den Quarziten sowie den Gneisen.

Das arithmetische Mittel der Koeffizienten beträgt bei den natürlichen Gesteinskör-

nungen 16,8 M.-%, die Werte umfassen eine Spanne von 9,7 bis 26,9 M.-%.

Die Reihung der Gesteine nach aufsteigendem Los Angeles-Koeffizienten in Abbildung 3-4 zeigt, dass die Kalksteine (chemische Sedimentgesteine) und die Granite (magmatisches Tiefengestein) vergleichsweise hohe Werte, meist über 20 M.-%, aufweisen. Der Koeffizient von Kalkstein 3 liegt um mehr als 5 M.-% unter den Koeffizienten der anderen Kalksteine, einschließlich des dolomitischen Kalksteins. Die Werte der Granite 12 und 13 weisen nur geringe Abweichungen auf.

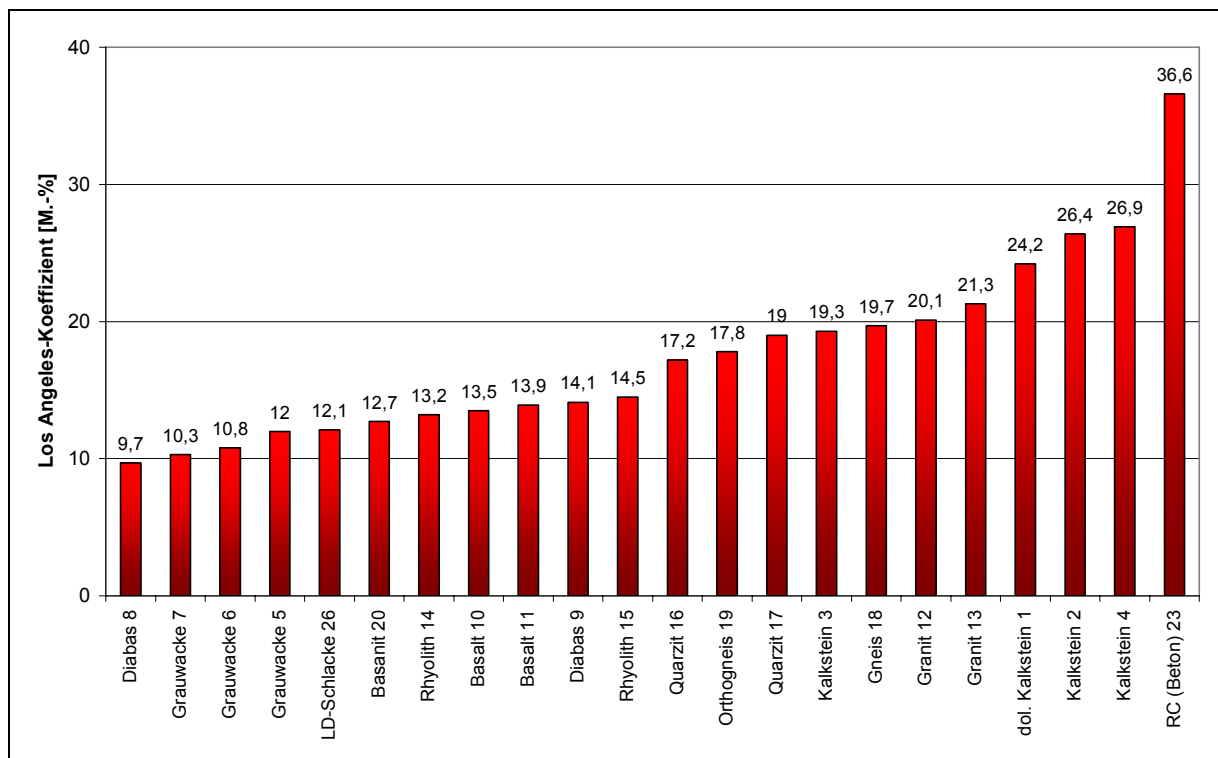


Abbildung 3-4: Reihung der Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Los Angeles-Koeffizienten

Dagegen wurden bei den Grauwacken durchgängig sehr geringe Werte zwischen 10 und 12 M.-% ermittelt. Die Koeffizienten der 2 untersuchten Diabase weisen eine Differenz von mehr als 4 M.-% auf, wobei sich der insgesamt geringste Wert bei dem Diabas 8 ergab. Die Koeffizienten der untersuchten Basalte und Rhyolite sowie des Basanits befinden sich im geringen bis mittleren Bereich zwischen 12 und 15 M.-%, unterhalb des Mittelwertes der natürlichen Gesteinskörnungen.

Mit Ausnahme der untersuchten Kalksteine weisen die nach Kapitel 2 zur Gruppe der feinkörnigen und dichten Gesteine gehörenden Materialien wie der Diabas, der Basalt und der Basanit tendenziell geringe Werte auf. Die Koeffizienten der grobkörnigen Granite sind vergleichsweise hoch; die mittelkörnigen bis grobkörnigen Gneise liegen etwas darunter.

Von den RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten wurden die in den entsprechenden Körnungen vorliegenden Materialien geprüft. Der Koeffizient des RC-Betons 23 weicht mit einem Wert von 36,6 M.-% deutlich von den ansonsten ermittelten Werten ab. Die LD-Schlacke 27 weist einen sehr geringen Wert von 12,1 M.-% auf.

3.3.2.3 Schlagzertrümmerungs-Verfahren (8/12 mm)

Die Schlagzertrümmerungswerte der Prüfkörnung 8/12 mm wurden, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, aus jeweils vier Prüfzeugnissen entnommen. Eine Ausnahme stellt der Basanit 20 dar, für den nur ein SZ-Wert in Erfahrung gebracht werden konnte.

In Abbildung 3-5 sind die Schlagzertrümmerungswerte als Mittel aus vier Werten dargestellt. Ein geringer Wert entspricht dabei einer hohen Schlagfestigkeit.

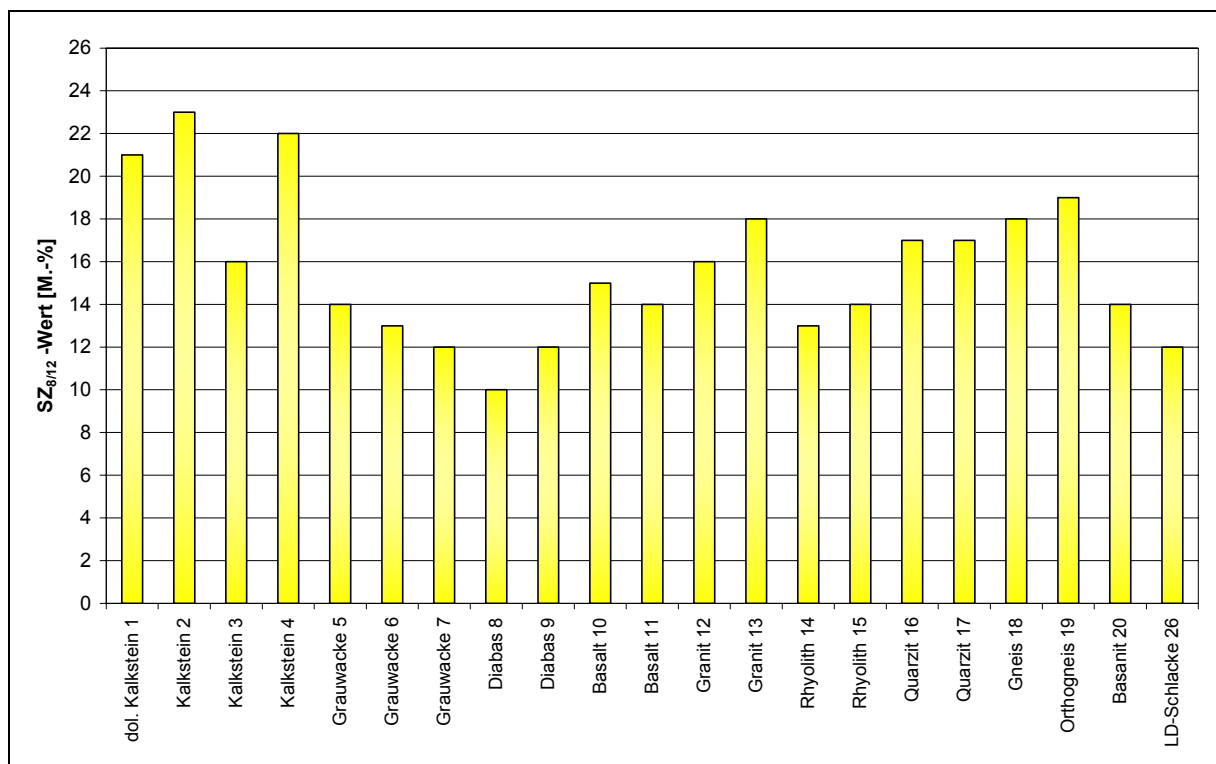


Abbildung 3-5: Schlagzertrümmerungswerte 8/12 mm

Die Werte liegen in einem Bereich zwischen 10 bis 23 M.-%; das arithmetische Mittel der dargestellten Werte liegt bei 15,7 M.-%.

Die SZ-Werte der Kalksteine 1, 2 und 3 liegen in einem Bereich zwischen 21 und 23 M.-%, wobei bei Kalkstein 3 ein geringerer Wert von 16 M.-% ermittelt wurde. Bei den Grauwacken 5 bis 7 ist ein leichter Rückgang des SZ-Wertes von 14 auf 12 M.-%

% festzustellen. Diabas 8 weist einen um 2 M.-% geringeren SZ-Wert auf als Diabas 9.

Die Werte der untersuchten Basalte, Rhyolite, Quarzite und Gneise weichen bei der jeweiligen Gesteinsart um weniger als 1 M.-% voneinander ab.

Die nach aufsteigendem SZ-Wert gereihten Gesteinskörnungen sind in Abbildung 3-6 dargestellt.

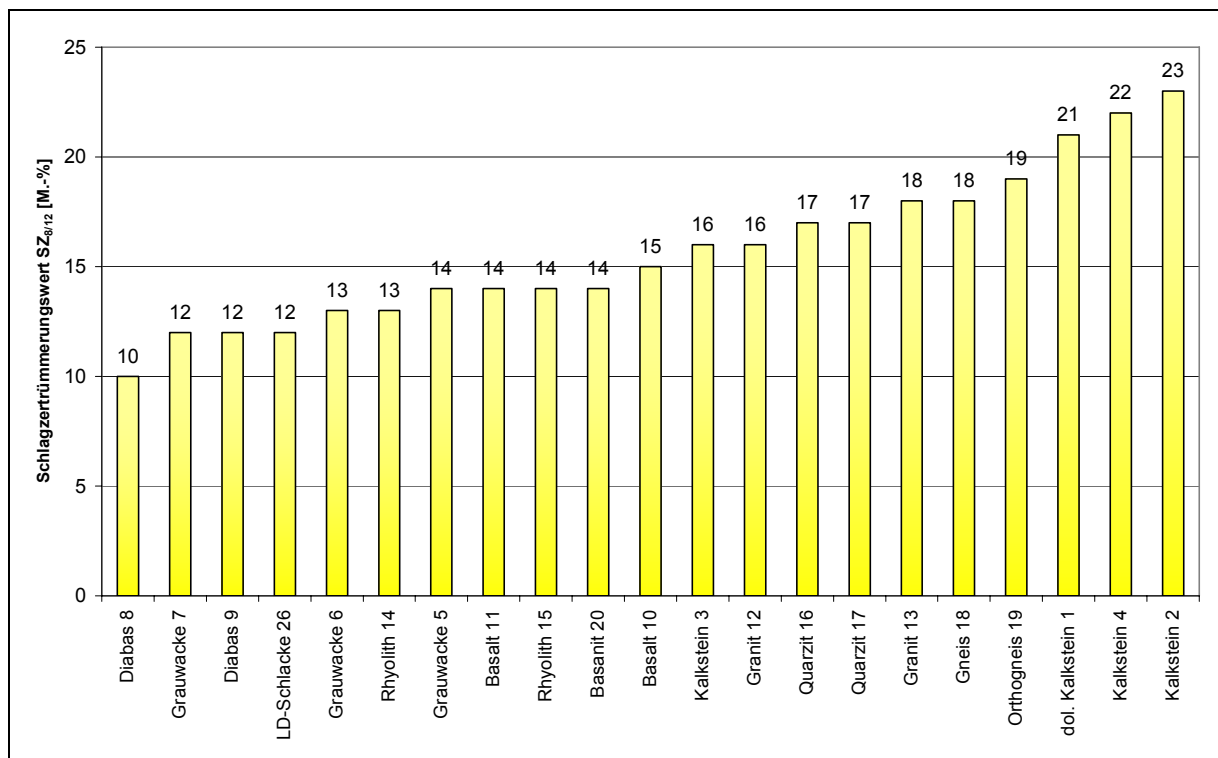


Abbildung 3-6: Reihung der Gesteine nach aufsteigendem SZ-Wert

Gesteine wie der Diabas, Grauwacke sowie die LD-Schlacke weisen eine hohe Beständigkeit gegenüber Schlagbeanspruchung auf, wogegen Kalksteine, Gneise und Granite über eine geringe Beständigkeit verfügen. Der SZ-Wert des dolomiti-schen Kalksteins 1 ist niedriger als der der Kalksteine 2 und 4; der Wert des Kalksteins 3 liegt im mittleren Bereich.

Die Basalte, der Basanit und die Rhyolithe zählen zu den Gesteinen mit mittlerer Schlagfestigkeit.

3.4 Kugelmühlen-Verfahren 0/2

3.4.1 Versuchsbeschreibung

Die Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle erfolgte gemäß den Anforderungen der TP Min-StB, Teil 5.4.2. Die Gesteinskörnungen wurden bei einem Durchmesser < 1 mm mit Hilfe der Luftstrahlsiebung an der FS 1 zusammengesetzt. Insgesamt

wurden je Material sechs Prüfungen durchgeführt.

3.4.2 Versuchsergebnisse

Die Prallprüfung in der Kugelmühle erfolgte je Gesteinsart an sechs Einzelproben. Aus diesen Werten wurden das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung berechnet, die 0,73 M.-% beträgt. Vergleichsweise hohe Standardabweichungen ergaben sich bei den RC-Baustoffen Beton (1,2 M.-%) und Ziegel (1,2 M.-%) sowie bei dem Hüttensand (1,4 M.-%) und den beiden Quarziten (1,2 und 1,5 M.-%). Sehr geringe Streuungen wurden unter anderem bei der LD-Schlacke (0,21 M.-%) und dem Kalkstein 2 (0,15 M.-%) festgestellt.

Neben der Bestimmung der Standardabweichung wurden mögliche Ausreißer anhand des Verfahrens nach Davies und Gather [50] überprüft. Bei dem recycelten Beton 23 und RC (TL-Gest.) 21 wurden einzelne Ausreißer festgestellt.

Beispielhaft für die in der Kugelmühle erfolgende Kornverfeinerung ist eine Probe 0,09/2 mm in Bild 3-1 vor und nach Beanspruchung abgebildet.

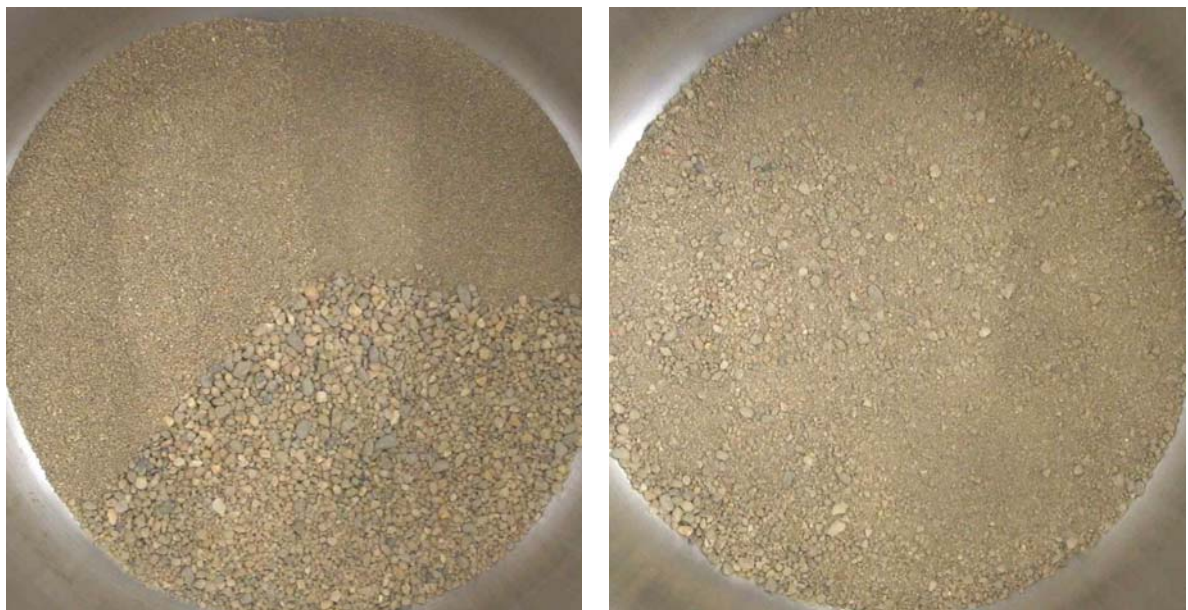


Bild 3-1: Proben (0,09/2 mm) vor (links) und nach (links) Beanspruchung in der Kugelmühle

Die Ergebnisse der Prallprüfung an feinen Gesteinskörnungen 0/2 mm sind in der Abbildung 3-7 als Mittelwerte aus sechs Einzelprüfungen dargestellt. Im Unterschied zu dem Micro-Deval-Verfahren und dem Los Angeles-Verfahren lagen alle Gesteinskörnungen in der Körnung 0/2 mm vor.

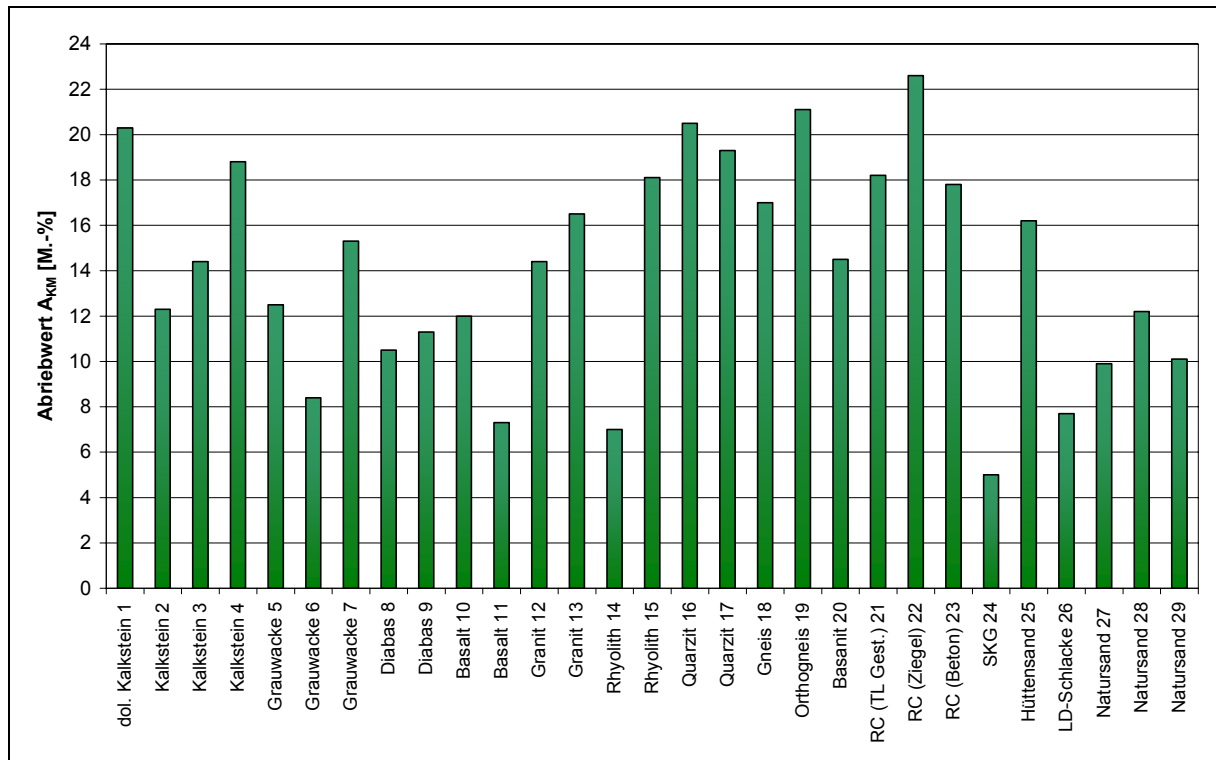


Abbildung 3-7: Ergebnisse der Bestimmung des Abriebwertes A_{KM} mit dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2

Die ermittelten Werte aller Körnungen liegen in einem Bereich von 5,0 bis 22,6 M.-% (Spanne: 17,6 M.-%) und weisen damit eine aussagekräftige Spannweite auf. Das arithmetische Mittel der Werte beträgt 14,2 M.-%.

Bei den untersuchten Kalksteinen ist eine Differenzierung anhand der ermittelten Werte möglich. Die Abriebwerte der Kalksteine 2 und 3 sind niedriger als bei den Kalksteinen 1 und 4, welche sich auf einem ähnlichen Niveau befinden. Unterschiede wurden auch bei den Grauwacken 5 bis 7 festgestellt, wobei Grauwacke 6 einen geringeren Wert aufweist. Deutliche Abweichungen liegen bei den Rhyolithen vor, in weniger ausgeprägter Form bei den Basalten und den Gneisen.

Die Werte der Natursande liegen einheitlich in einem Bereich zwischen 10 und 12 M.-%; Natursand 28 verfügt dabei über die geringere Abriebfestigkeit. Geringe Abweichungen der Werte gleicher Gesteinsarten wurden bei den Diabasen, den Graniten und den Quarziten festgestellt.

Wie die in Abbildung 3-8 dargestellte Reihung der Gesteinskörnungen zeigt, liegt eine gleichmäßige Verteilung der Werte vor. Von der Gesamtheit deutlich abweichende Werte sind nicht zu erkennen.

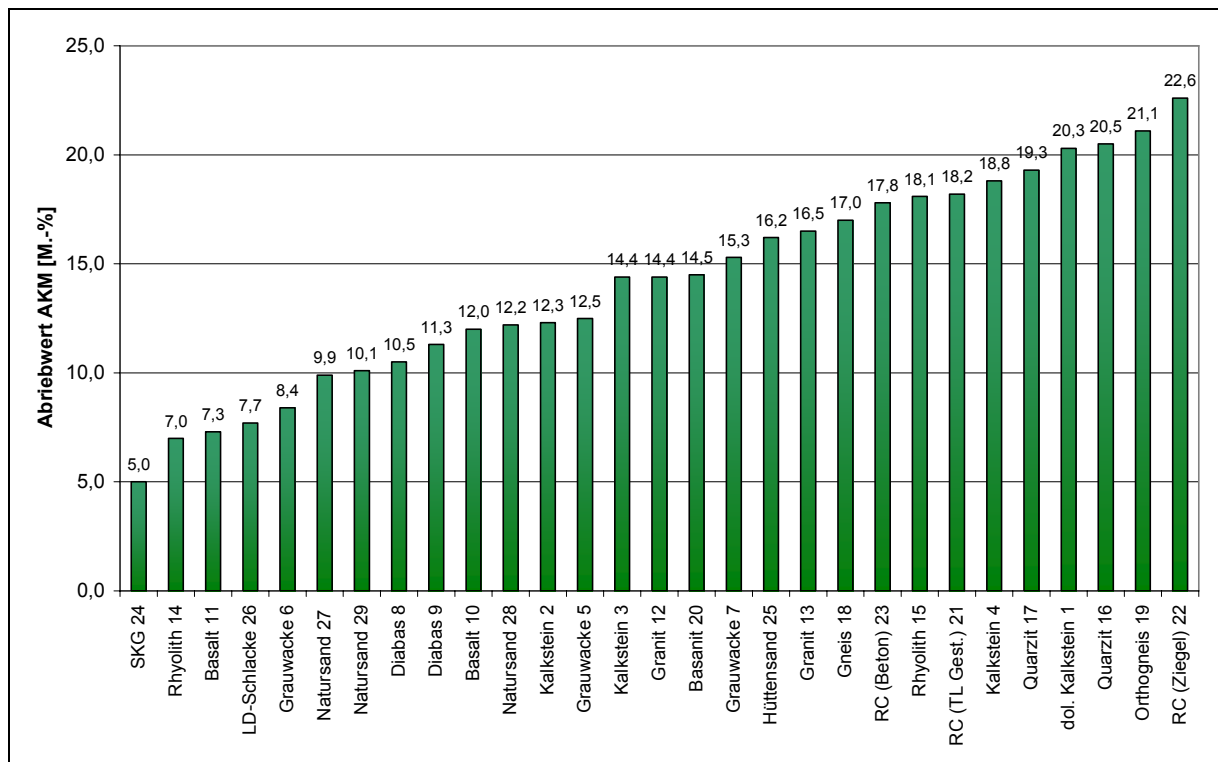


Abbildung 3-8: Reihung der Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Abriebwert

Die Kalksteine und Quarzite weisen vergleichsweise hohe Abriebwerte, meist über 14 M.-%, auf. Der dolomitische Kalkstein 1 ist weniger beständig als die anderen untersuchten Kalksteine.

Die Abriebwerte der Gneise befinden sich im mittleren bis oberen Bereich; die untersuchten Granite weisen mittlere Abriebwerte auf.

Zu den Gesteinskörnungen mit geringen Abriebwerten und dementsprechender hoher Abriebfestigkeit gehören die Natursande. Eine hohe Abriebbeständigkeit wurde auch bei den Diabasen und den Basalten sowie den industriellen Nebenprodukten Schmelzkammergranulat und Stahlwerkschlacke festgestellt.

Die Abriebbeständigkeit der Rhyolite reicht in Abhängigkeit vom betrachteten Material von sehr hoch bis gering.

3.5 Fließkoeffizient an feinen Gesteinskörnungen

3.5.1 Versuchsbeschreibung

Als ergänzende Untersuchung wurde die Bestimmung des Fließkoeffizienten in Anlehnung an die DIN EN 933-6 [51] beschlossen. Der Fließkoeffizient ist ein Maß für die Beschaffenheit der Kornform und dient z. B. der Unterscheidung von Brech- und Natursand.

Durch die Bestimmung des Koeffizienten einer Probe vor und nach der Abriebbeanspruchung soll untersucht werden, inwieweit die Kornform durch den Abrieb beeinflusst wird. Eine Veränderung der Kornform kann mit der Stabilität des Korngerüstes einhergehen und ist so ein wichtiger Faktor bei der Entstehung von Schäden in Pflasterbefestigungen. Die hier zusätzlich eingeplanten Untersuchungen sollen dafür Anhaltswerte bieten.

Für die Untersuchungen wurde abweichend von der DIN EN 933-6 die Prüfprobe aus sechs beanspruchten Proben mit jeweils 100 g zusammengesetzt. Als Vergleich wurde der Fließkoeffizient jeweils an einer Probe aus nicht abgeriebenen Gesteinskörnungen mit übereinstimmender Korngrößenverteilung und entsprechender Masse bestimmt. Die Beanspruchung erfolgte durch die Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle und durch das modifizierte Micro-Deval-Verfahren ((MMD-Verfahren, s. Kapitel 4.1) an den Prüfkörnungen 0/2 mm und 0,25/5,6 mm.

Um Verwechslungen mit dem streng nach DIN EN 933-6 ermittelten Fließkoeffizienten zu vermeiden, wird die nach oben beschriebenen Vorgaben durchgeführte Untersuchung im Folgenden als Bestimmung des „modifizierten Fließkoeffizienten“ bezeichnet.

3.5.2 Versuchsergebnisse

In Abbildung 3-9 sind die Mittelwerte der modifizierten Fließkoeffizienten vor und nach der Abriebbeanspruchung der Proben 0,09/2 mm mit dem Kugelmühlen-Verfahren dargestellt. Entsprechend den Vorgaben für die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen bis 2 mm wurde der Trichter mit einer Öffnungsweite von 12 mm verwendet.

Die ermittelten Ausflusszeiten liegen im Bereich zwischen 16 und 42 s, wobei die Fließkoeffizienten der Quarzite 16 und 17 aufgrund der sich im Trichter verkeilenden Proben nicht bestimmt werden konnten.

Bei der Mehrheit der untersuchten Gesteinskörnungen ist eine leichte Zunahme der Ausflusszeit nach der Prallprüfung zu erkennen. Auffällig ist die im Vergleich starke Zunahme der Ausflusszeit bei den RC-Baustoffen.

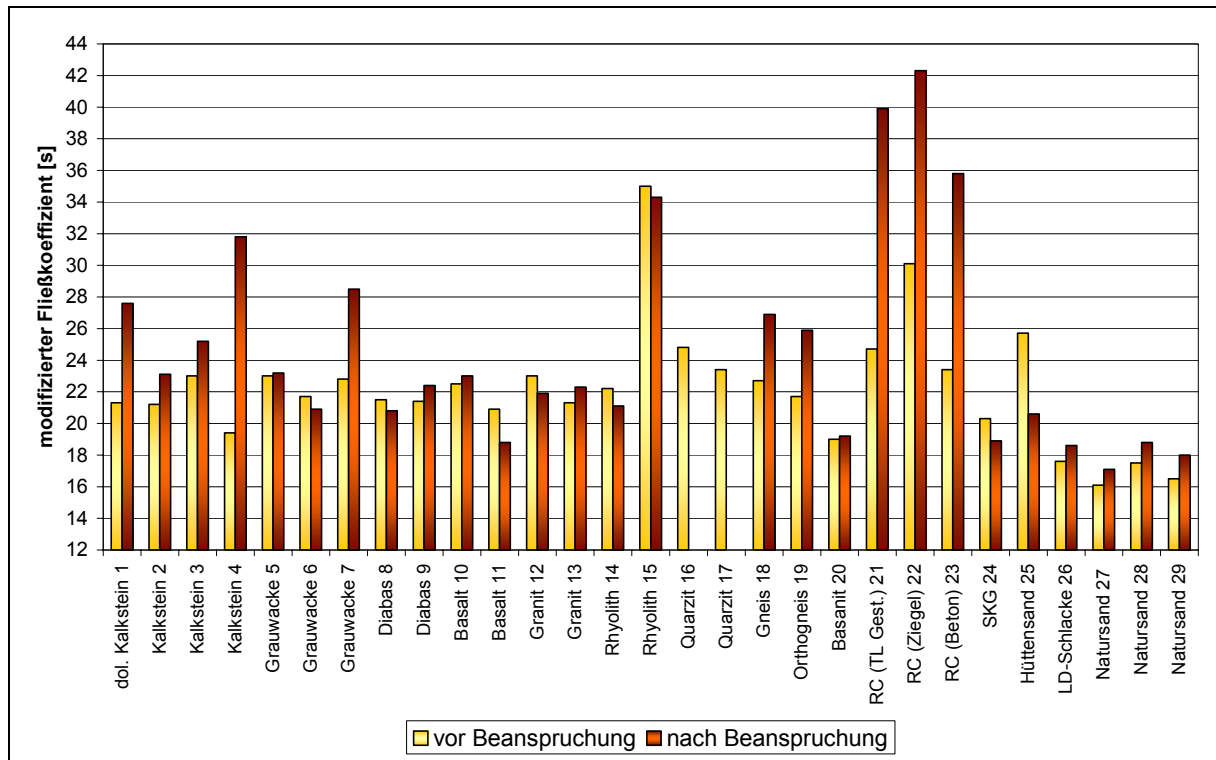


Abbildung 3-9: Modifizierter Fließkoeffizient vor und nach Prallprüfung an Sand 0/2 mm

3.5.2.1 Modifizierter Fließkoeffizient beim MMD-Verfahren 0,25/5,6 mm

Nach Durchführung des MMD-Verfahrens gemäß Kapitel 4 wurden die belasteten Proben zur Bestimmung des Fließkoeffizienten in den Trichter mit einer Öffnungsweite von 16 mm gegeben. Trotz wiederholter Durchführung konnte der Fließkoeffizient bei der Mehrheit der Proben nicht bestimmt werden, da diese sich während des Ausfließens im Trichter verkanteten. Daraufhin wurde die Bestimmung des Fließkoeffizienten an Proben 0,25/5,6 mm aus dem MMD-Verfahren verworfen.

3.5.2.2 Modifizierter Fließkoeffizient beim MMD-Verfahren 0/2 mm

Da die Feinanteile $< 0,063$ mm zur Bestimmung der Korngrößenverteilung nach Abriebbeanspruchung ausgewaschen wurden, weist jede Probe eine unterschiedliche Masse auf. Ein direkter Vergleich der Ausflusszeiten ist dadurch nicht möglich. In Tabelle 3-3 ist die auf die Masse bezogene Ausflussdauer für die sieben untersuchten Materialien dargestellt. Die Ausflussdauer der ursprünglichen Probe wurde mit einer Masse von 600 g ermittelt (s. Kapitel 3.5.1).

Tabelle 3-3: Ausflussdauer vor und nach Beanspruchung durch das MMD 0/2-Verfahren

Material	Auf die Masse bezogene Ausflussdauer in (Sekunden/Gramm)*100		
	unbeansprucht	500 Umdrehungen	1500 Umdrehungen
Kalkstein 1	3,550	2,897	3,136
Kalkstein 3	3,833	3,105	3,048
Grauwacke 7	3,800	3,036	3,332
Diabas 9	3,567	3,076	2,844
Rhyolith 14	3,700	3,312	3,125
RC-Ziegel 22	5,017	4,232	4,597
Natursand 28	2,917	2,915	3,195

Die Ausflussdauer der durch 500 Umdrehungen beanspruchten Probe verringert sich im Vergleich zum Material im ursprünglichen Zustand. Daraus kann auf eine durch die Abriebbeanspruchung verursachte Abnahme der Kantigkeit der Körner geschlossen werden. Trotz zunehmender Verfeinerung der Probe nach 1500 Umdrehungen wurde eine im Vergleich zu den Proben mit 500 Umdrehungen mehrheitlich höhere Ausflussdauer festgestellt. Die erneute Zunahme könnte auf den durch das Auswaschen der Probe geringeren Anteil an Körnern < 0,063 mm zurückgeführt werden.

4 Modifizierte Abriebprüfungen

4.1 Modifiziertes Micro-Deval-Verfahren (MMD) 0/5

4.1.1 Voruntersuchungen, Anpassung der Verfahren

4.1.1.1 Vorgehen

In den Voruntersuchungen [u. a. 13] wurde u. a. überprüft, inwieweit das in Kapitel 2.2.4 beschriebene Kugelmühlen-Verfahren nach TP Min-StB und das Micro-Deval-Verfahren in Anlehnung an die NF P 18-576, Teil 2 in angepasster Form zur Prüfung von Gesteinskörnungen bis 5,6 mm Korndurchmesser geeignet sind. Beide Verfahren sind für die Prüfung von feinen Körnungen 0/2 mm vorgesehen, ein Erfahrungshintergrund für die Prüfung nach NF P 18-576 besteht nicht. Zudem wurde das für die Prüfung von groben Körnungen 10/14 mm ausgelegte Micro-Deval-Verfahren nach DIN EN 1097-1 für die Entwicklung des neuen Verfahrens in Betracht gezogen.

Da der Größtkorndurchmesser von herkömmlichem Bettungsmaterial bei 5 bis 8 mm liegt, ist eine Anpassung der bestehenden Verfahren erforderlich gewesen. In Voruntersuchungen wurden unter Variation der Prüfparameter geeignete Randbedingungen für die Prüfung von Bettungsmaterialien mit dem Micro-Deval-Verfahren bestimmt. Dabei wurden der Einfluss der Korngrößenverteilung der Probe (Ober- und Untergrenze), der Zugabe von Wasser, der Anzahl der Umdrehungen und der Trommelgröße sowie der Reibladung auf den Abrieb der Prüfprobe untersucht. Die Prüfung erfolgte an einem Basalt, einem Diabas, einem Kalkstein sowie an einem Natursand.

4.1.1.2 Einflussgrößen

- Korngrößenverteilung (Feinanteil)

Die in Abbildung 4-1 dargestellten Korngrößenverteilungen der Ober- und Untergrenzen für Bettungsmaterialien entsprechen den Empfehlungen des M FP 1. Die in rot dargestellte Korngrößenverteilung weist einen Feinkornanteil $< 0,25$ mm von 9 M.-% auf, während bei dem durch die blaue Kurve charakterisiertem Korngemisch der Anteil $< 0,25$ mm abgetrennt wurde.

Beispielhaft sind die Korngrößenverteilungen vor (durchgehende Linie) und nach Beanspruchung (unterbrochene Linie) in Abbildung 4-2 für den untersuchten Kalkstein dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Feinanteil zeigt, dass die Körnung 0/0,25 mm keinen maßgeblichen Einfluss auf die Abriebbeanspruchung des Materials hat. Die Korngrößenverteilungen der Proben nach Beanspruchung weisen nur geringe Abweichungen auf. Insbesondere der Anteil $< 0,25$ mm, der im Aus-

gangszustand unterschiedlich war, ist nach der Abriebbeanspruchung identisch.

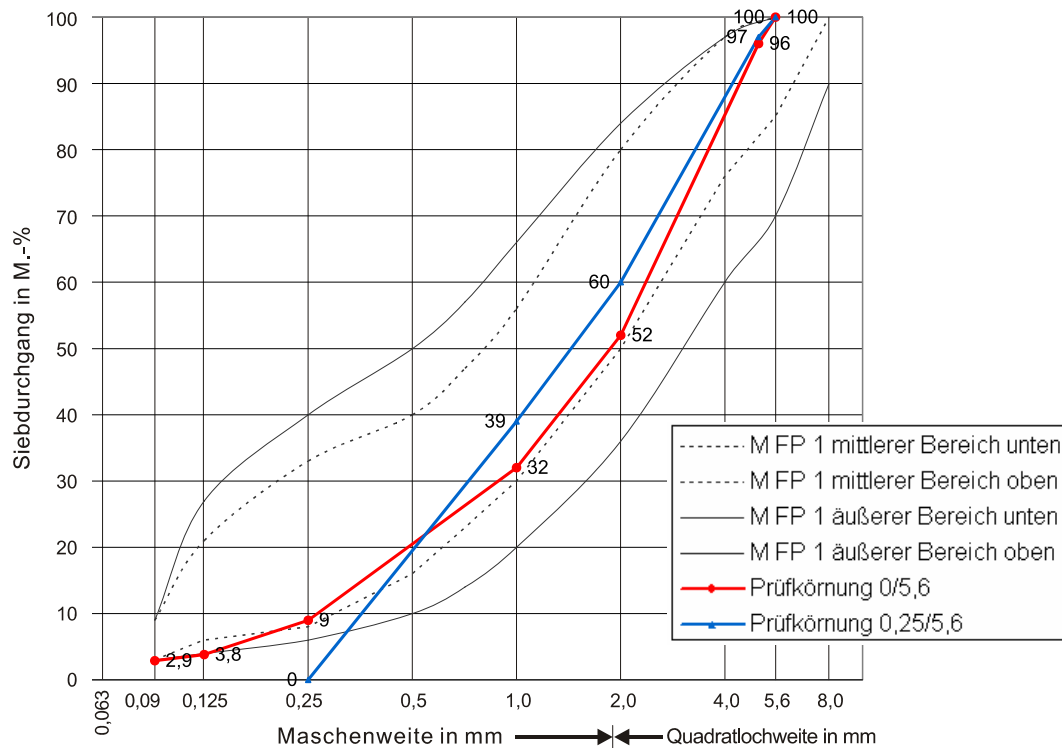


Abbildung 4-1: Darstellung der untersuchten Varianten der Korngrößenverteilungen der Proben

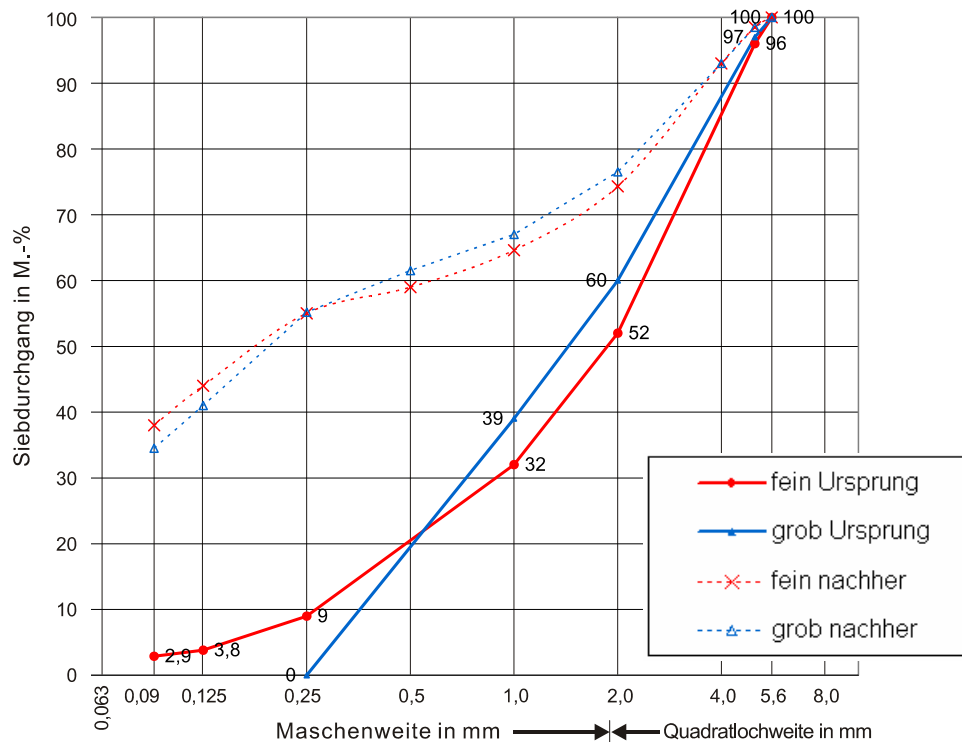


Abbildung 4-2: Darstellung der Korngrößenverteilungen nach Abriebbeanspruchung mit und ohne Feinanteil 0/0,25 mm bei Kalkstein

- Anzahl der Umdrehungen

Die Abbildung 4-3 zeigt die mit steigender Zahl der Umdrehungen der Trommel wachsende Verfeinerung der Prüfkörnung beispielhaft für den untersuchten Kalkstein. Dargestellt sind die Korngrößenverteilungen im Ausgangszustand (blau) sowie nach 500 (rosa), 750 (grün), 1500 (orange) und 3000 (lila) Umdrehungen.

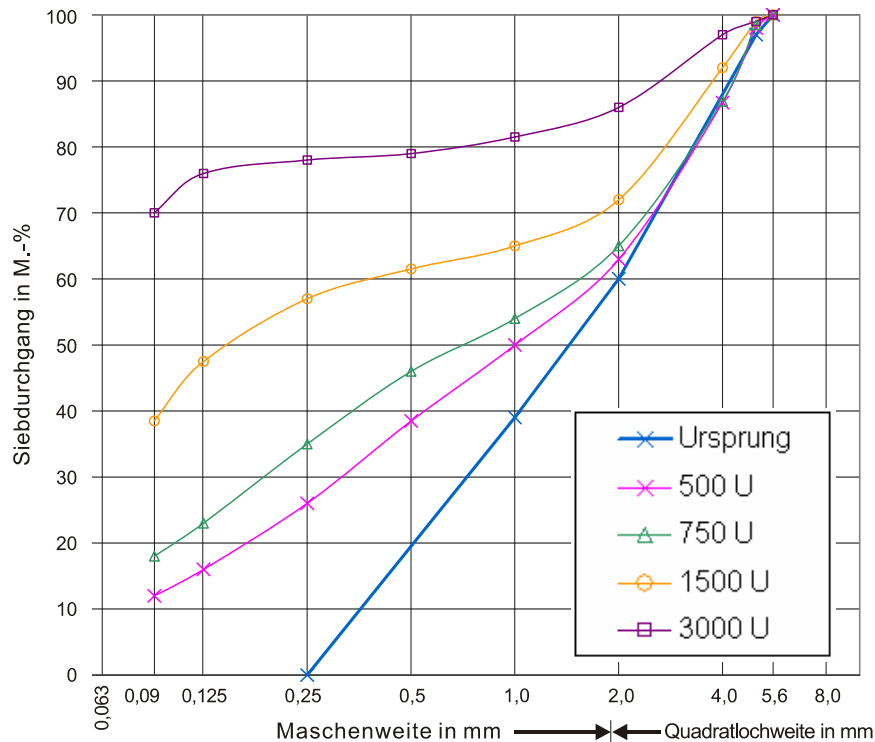


Abbildung 4-3: Darstellung der Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Umdrehungszahlen (EN Trommel, NF P Beladung)

Die Untersuchungen an der Prüfkörnung 0,25/5,6 mm ergaben, dass mit steigender Umdrehungszahl die Durchgänge durch die verwendeten Siebe 0,09 mm und 0,125 mm bis zu einer bestimmten Umdrehungszahl nahezu konstant ansteigen. Ab einer Beanspruchung von mehr als 1500 U/min wurde bei bestimmten Gesteinen eine Abnahme der Steigung festgestellt.

Die verminderte Zunahme beruht vermutlich auf dem hohen Grad der Zermahlung der Probe bei über 1500 U/min. Ab dieser Beanspruchung sind die Körner soweit zermahlen, dass ein weiterer gleichmäßiger Anstieg nicht mehr möglich ist. Zudem weisen die bei bestimmten Prüfsieben ermittelten Durchgänge eine zufrieden stellende Spreizung der Werte bei 1500 U/min auf, so dass eine gute Differenzierung der Materialien möglich ist. Der Vergleich der Ergebnisse der Prüfung von Basalt und Kalkstein unter gleichen Bedingungen zeigt, dass die Differenzierung der Materialien bei 500, 1500 und 3000 U/min etwa gleichbleibend ist, wogegen bei 750 U/min eine

leicht geringere Differenzierung vorlag.

- Zugabe von Wasser

Der Vergleich der Ergebnisse der Prüfung mit und ohne Zugabe von Wasser zeigt, dass die Abriebbeanspruchung bei Zugabe von Wasser erwartungsgemäß höher ist.

Eine mögliche Ursache liegt in der fehlenden Pufferwirkung des Feinkorns: Durch das Wasser wird das Haften des Feinkorns an den gröberen Körnungen weitgehend vermieden, womit die Pufferwirkung des Feinkorns nicht zum tragen kommt. Weiterhin kann Wasser die Festigkeit von Gesteinskörnungen herabsetzen, wie in [52] nachgewiesen werden konnte. Schäden am Bettungsmaterial sind, wie in Kapitel 2.3.3 erläutert, vermehrt bei dem Vorhandensein von Wasser zu befürchten, so dass die Prüfung mit Wasser im Sinne der größtmöglichen Übereinstimmung mit den realen Bedingungen als zweckmäßig befunden wurde.

- Größe der Trommel

Zur Findung einer geeigneten Trommelgröße wurden die Ergebnisse der Prüfung mit der in Kapitel 2 beschriebenen Trommel nach DIN EN 1097-1 (DIN EN) und der Trommel nach NF P 18-576 (NF) verglichen.

Das Volumen der Trommel nach DIN EN beträgt 4.838 cm^3 und ist damit etwa halb so groß wie das Volumen der Trommel nach NF (9.425 cm^3). Das größere Volumen der Trommel nach NF hat längere Fallwege der Kugeln zur Folge und ist mit einem halb so großen Befüllungsgrad verbunden. Dies bewirkt eine höhere Beanspruchung durch Schlag bei der Trommel nach NF, wogegen in der Trommel nach DIN EN eine überwiegende Abriebbeanspruchung zu erwarten ist. Die Trommel der DIN EN stellt im Vergleich zur NF die in deutschen Prüflaboren übliche Variante dar. Zudem ist aufgrund der geringeren Größe die parallele Durchführung von zwei Prüfungen mit der Trommel gemäß DIN EN möglich.

In Abbildung 4-4 sind exemplarisch die Korngrößenverteilungen des Kalksteins nach Beanspruchung durch 1500 U/min bei verschiedenen Trommelgrößen dargestellt. Der Vergleich der Korngrößenverteilungen der beanspruchten Probe in der Trommel nach NF (rot) und nach DIN EN (blau) zeigt, dass bei Verwendung der Trommel nach NF eine stärkere Verfeinerung im Bereich der Körnungen $> 0,5 \text{ mm}$ zu erwarten ist, während im Bereich $< 0,5 \text{ mm}$ die Verfeinerung der Körner bei der Trommel nach EN stärker ausgeprägt ist.

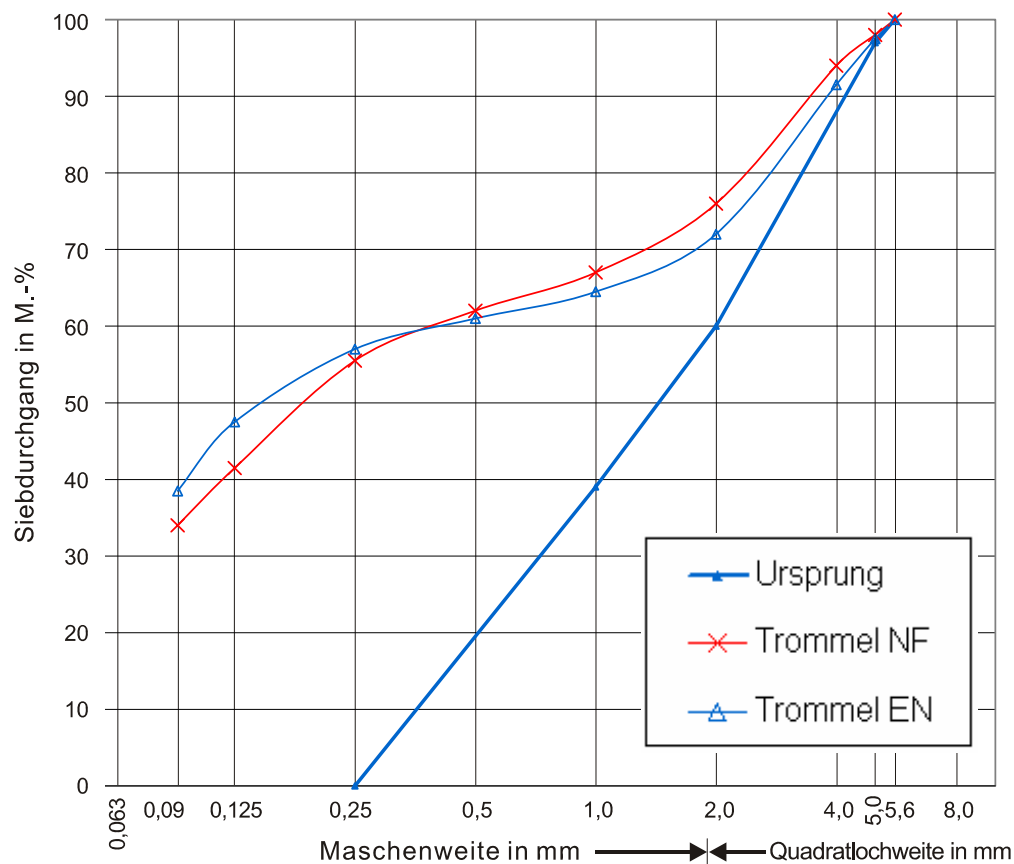


Abbildung 4-4: Darstellung der Korngrößenverteilungen bei unterschiedlichen Trommelgrößen (Kalkstein, 1500 Umdrehungen) vor und nach Beanspruchung

- Art der Reibladung

In den Voruntersuchungen wurden die Proben unter sonst gleichen Bedingungen mit Reibladungen nach NF und DIN EN beansprucht. Wie in Kapitel 2 beschrieben, besteht die Reibladung nach DIN EN aus Stahlkugeln mit einem konstanten Durchmesser von 10 mm, während die NF die Zusammensetzung der Reibladung aus Stahlkugeln mit verschiedenen Durchmessern zwischen 10 bis 30 mm vorsieht. Die Masse der Ladung nach EN ist mit insgesamt 5.000 g doppelt so groß wie nach Vorgaben der NF.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Reibladung nach EN zu einem geringem Abrieb bei Körnern > 2 mm führt, da der Durchmesser der Stahlkugeln zu gering ist, um eine ausreichende Schlagbeanspruchung zu erzielen. Bei den Stahlkugeln mit einem Durchmesser bis 30 mm wurde eine stärkere Zerkleinerung der Körner > 2 mm festgestellt.

Der unterschiedliche Befüllungsgrad zeigte keinen Einfluss auf das Abriebverhalten.

4.1.1.3 Schlussfolgerungen

Aus den in den Voruntersuchungen gesammelten Erkenntnissen wurden nach Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss die Prüfbedingungen für die Modifizierung des herkömmlichen Micro-Deval-Verfahrens festgelegt.

Die Probe wird - wie in Tabelle 4-1 dargestellt - nach den Vorgaben des M FP 1 zusammengesetzt werden. Die zu prüfende Körnung 0,25/5,6 mm entspricht einem üblichen Bettungsmaterial. Da kein Einfluss des Anteils < 0,25 mm festgestellt wurde und ein geringerer Arbeitsaufwand für die Zusammensetzung zu erwarten ist, wurde der Kleinstkorndurchmesser von 0,25 mm gewählt.

Tabelle 4-1: Zusammensetzung der Probe für die Prüfung mit dem MMD-Verfahren

Siebennöffnungsweite	Rückstand	Rückstand	Durchgang
[mm]	[g]	[M.-%]	[M.-%]
5,6	0,0	0,0	100
5,0	15,0	3,0	97
4,0	45,0	9,0	88
2,0	140,0	28,0	60
1,0	115,0	23,0	37
0,71	35,0	7,0	30
0,5	50,0	10,0	20
0,25	100,0	20,0	0
Σ	500,0	100	

Der Versuch wird mit insgesamt 1500 Umdrehungen bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 100 U/min durchgeführt. Es ist eine Trommel mit den Maßen $d = 154$ mm und $L = 200$ nach DIN EN 1097-1 zu verwenden.

Die Reibladung wird aus 9 Kugeln $\varnothing = 30$ mm, 21 Kugeln $\varnothing = 18$ mm und einer Menge von Kugeln mit $\varnothing = 10$ mm, die das Gesamtgewicht der Ladung auf 2500 g ergänzen, zusammengesetzt. Die beizugebende Wassermenge beträgt 2,5 l.

Die Auswertung erfolgt durch die Bestimmung der Korngrößenverteilung der beanspruchten Probe mit Hilfe der folgenden Prüfsiebe: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 0,71 mm, 1,0 mm, 2,0 mm, 4,0 mm, 5,0 mm und 5,6 mm.

Die Prüfung nach den o. g. Bedingungen wird als modifiziertes Micro-Deval-Verfahren, kurz MMD-Verfahren, bezeichnet. Die Prüfkörnung 0,25/5,6 mm wird im

Folgenden als 0/5 bezeichnet.

Die zur Durchführung des Verfahrens benötigte Trommel, die Reibladung und der Antriebsmechanismus sind in den Bildern 4-1 bis 4-3 abgebildet. In die über Schraubgewinde verschließbare Stahltrommel werden die Probe, die Zugabemenge an Wasser sowie die in Bild 4-2 zu erkennende Reibladung aus Stahlkugeln mit verschiedenen Durchmesser gegeben.

Die in Abbildung 4-3 dargestellte Apparatur erlaubt die zeitgleiche Prüfung von vier Einzelproben.

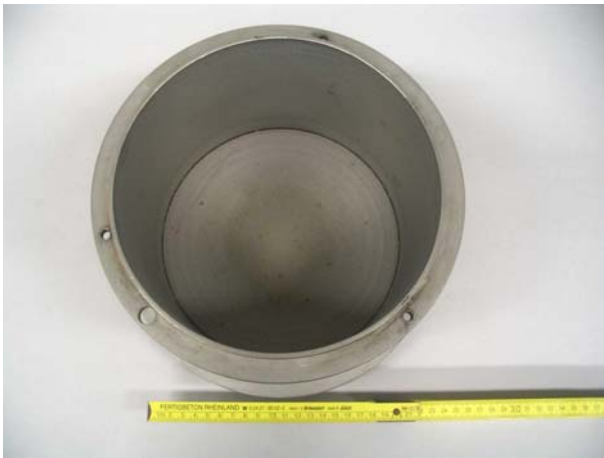


Bild 4-1: Trommel nach DIN EN 1097-1

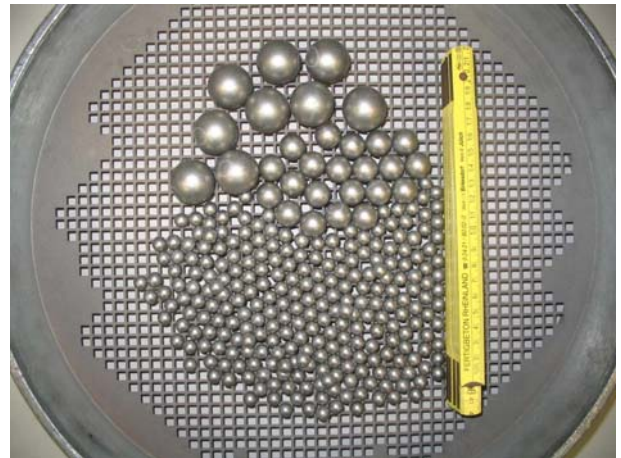


Bild 4-2: Reibladung aus Stahlkugeln



Bild 4-3: Apparatur zur Rotation der Trommeln

Der prinzipielle Aufbau des MMD-Verfahrens ist in Abbildung 4-5 skizziert. Die bei Versuchsdurchführung im Inneren der Stahltrommel (5) befindliche Reibladung aus Stahlkugeln (1 bis 3) und Wasser vermischt sich mit der Probe (4) und belastet bei

Rotation die Einzelkörner durch Reib- und Mahlkräfte.

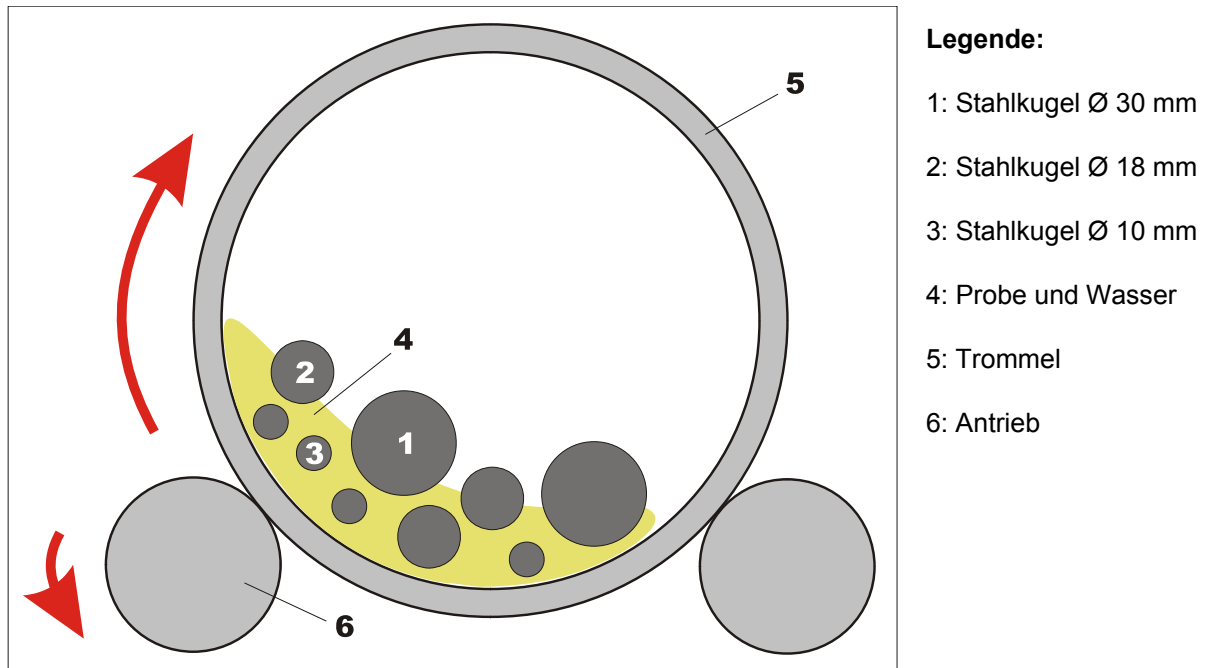


Abbildung 4-5: Skizze zum Aufbau des MMD-Verfahrens

4.1.2 Ergebnisse des MMD-Verfahrens 0/5

4.1.2.1 Qualitative Beschreibung des Abriebs

Die Untersuchung der äußeren Beschaffenheit der beanspruchten Körner ergab eine leichte Abnahme der Kantigkeit der Einzelkörner, die auf vorwiegend reibende und mahlende Kräfte während des Prüfvorganges schließen lassen.

Kennzeichnend für das beanspruchte Korn waren ein Rückgang von Unebenheiten, scharfen Kanten und Ausprägungen, welche bei den unbeanspruchten Körnern festgestellt wurden. Bild 4-4 zeigt einzelne Körner des Gneises 18 mit einem Durchmesser von 2 bis 5 mm vor und nach der Abriebbeanspruchung. Die augenscheinliche Betrachtung ergibt eine allgemein abgerundete Form der Körner, wobei der Anteil an stark plattigen oder stengeligen Körnern durch die Beanspruchung scheinbar vermindert wurde.

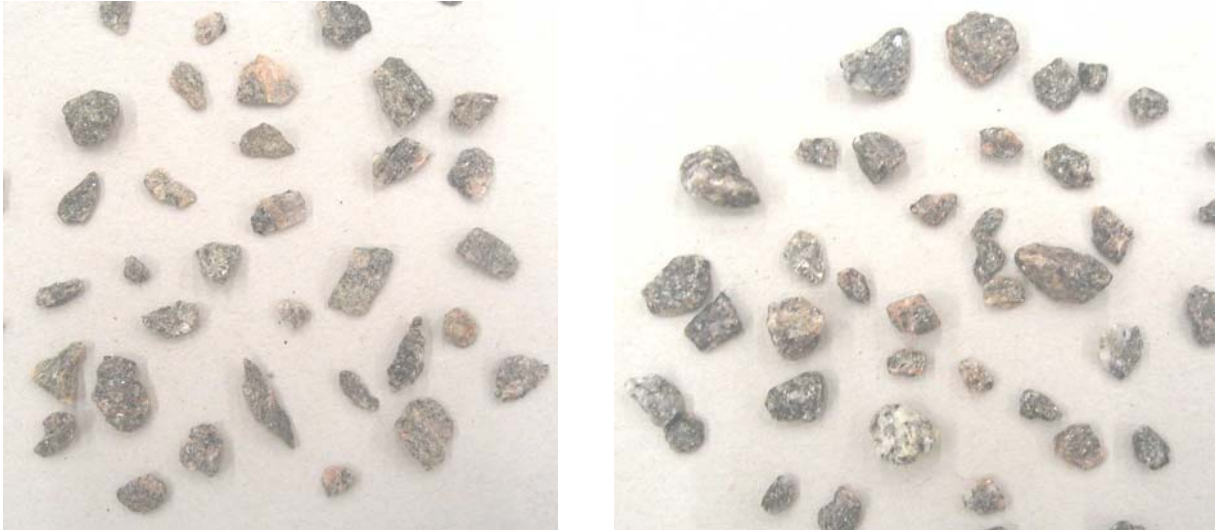


Bild 4-4: Gneis 18 (Korngröße 2 bis 5 mm) vor und nach Beanspruchung

Aussagen zur Veränderung der Oberflächenstruktur lassen sich auch mit Hilfe der Vergrößerung durch das Stereo-Lichtmikroskop nur bedingt treffen. Die Körner mit einem Durchmesser von 2 bis 5 mm zeigen nach Beanspruchung eine gewisse Glättung von hervorstehenden Kanten. Bei einigen Materialien, wie den dunklen Kalksteinen, waren Aufhellungen in den beanspruchten Bereichen zu erkennen.

Bei Untersuchung einzelner Proben wurden keine gespaltenen oder zerbrochenen Körner, wie sie für die Beanspruchung durch Schlag üblich sind, nach Beanspruchung festgestellt. Das Korn blieb vermutlich als Einheit bestehen, jedoch veränderte das Reiben der Stahlkugeln und der Behälterwand am Korn dessen Oberfläche.

4.1.2.2 Quantitative Beschreibung des Abriebs

In Anhang, Teil A sind die vollständigen auf die Analysesiebe bezogenen Durchgänge nach Abriebbeanspruchung der zusammengesetzten Proben in Tabelle A-1 aufgeführt, wobei jeder Wert dem arithmetischen Mittel aus 6 Einzelprüfungen entspricht.

- Standardabweichung der Siebdurchgänge

Die in Tabelle A-1 im Anhang dargestellten Siebdurchgänge je Material und Sieböffnungsweite wurden aus sechs Einzelwerten gemittelt. Um deren Streuungen beurteilen zu können, wurde die Standardabweichung aus der Messreihe von jeweils sechs Werten berechnet.

Die Betrachtung der Standardabweichungen ergab insgesamt sehr geringe Streuungen, jedoch ungewöhnlich große Streuungen bei dem Quarzit 17, welche auf den ersten zwei der insgesamt sechs Prüfungen beruhten. Aufgrund der vermutlich auf Unregelmäßigkeiten bei der Durchführung der Prüfung oder Schwankungen der

Materialeigenschaften zurück zu führenden Abweichungen wurden die ersten beiden Prüfungen bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt (statistische Ausreißer).

Tabelle 4-2 beinhaltet die über alle untersuchten Materialien gemittelten Standardabweichungen der Siebdurchgänge sowie deren Minimum, Maximum und Spanne.

Insgesamt fallen die Streuungen der Einzelwerte unabhängig vom betrachteten Sieb oder Material gering aus. Die mittlere Standardabweichung liegt in einem Bereich zwischen 0,3 und 0,5 M.-%. Vergleichsweise hohe Standardabweichungen bis zu 1,5 M.-% wurden bei der Prüfung des Schmelzkammergranulates 24 und bis zu 1,1 M.-% bei dem Basalt 11 festgestellt.

Tabelle 4-2: Standardabweichung der Siebdurchgänge aus 6 Werten je Analysesieb beim MMD-Verfahren

Kenn- werte	Standardabweichung der Siebdurchgänge [M.-%]								
	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0
Minimum	0,089	0,112	0,113	0,111	0,156	0,170	0,104	0,083	0,075
Maximum	0,928	1,086	1,543	1,543	1,285	1,214	1,198	0,514	0,385
Spanne	0,839	0,974	1,429	1,432	1,130	1,044	1,094	0,431	0,309
Arithm. Mittel	0,3391	0,4906	0,4699	0,4314	0,4346	0,4298	0,4930	0,2916	0,1970

Die Abbildung 4-7 enthält die Darstellung der gesamten Korngrößenverteilungen aller 29 Materialien nach Beanspruchung mit dem MMD-Verfahren. Die Korngrößenverteilungen verlaufen überwiegend in einem mittleren Bereich, der von unten durch die LD-Schlacke 26 und von oben durch den RC Ziegel 22 eingegrenzt wird. Die Abbildung zeigt, dass unterschiedliche Typen von Verläufen zu unterscheiden sind.

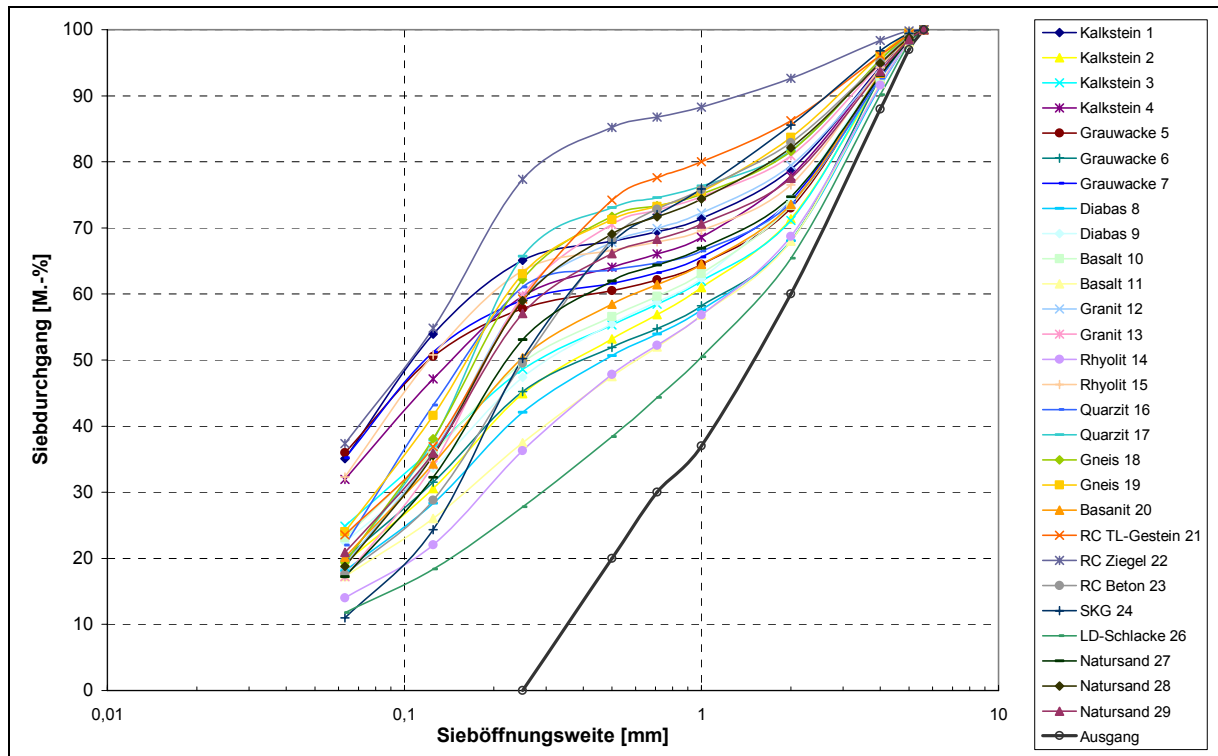


Abbildung 4-6: Korngrößenverteilungen aller Materialien im Vergleich (MMD 0/5)

In Abbildung 4-7 ist die Korngrößenverteilung des Basaltes 11 vor (schwarz) und nach (farbig) der Beanspruchung beispielhaft für ein abriebbeständiges Material dargestellt. Bei einem Korndurchmesser > 2 mm ist die Zunahme der Durchgänge vergleichsweise gering ausgeprägt. Die Korngrößenverteilungen vor und nach Beanspruchung verlaufen hier weitgehend parallel.

Unter 2 mm Korndurchmesser nimmt der Unterschied zwischen den Korngrößenverteilungen zu, wobei von 0,063 mm bis 2,0 mm eine nahezu konstante Steigung bei der Verteilung nach Beanspruchung vorliegt.

Als Beispiel für das Verhalten einer Gesteinskörnung mit geringem Abriebwiderstand ist die Korngrößenverteilung des Quarzites 17 in Abbildung 4-8 dargestellt. Die Betrachtung zeigt, dass bei Körnern < 2 mm im Vergleich zum Basalt 11 deutlichere Abweichungen der Verläufe vorhanden sind. Zudem ist im Bereich zwischen 0,063 und 0,25 mm eine markante Zunahme der Siebdurchgänge zu erkennen. Die farblich in gelb und rosa dargestellten Verläufe beruhen auf den ersten 2 Messungen, die wegen zu großer Abweichungen ausgeschlossen wurden.

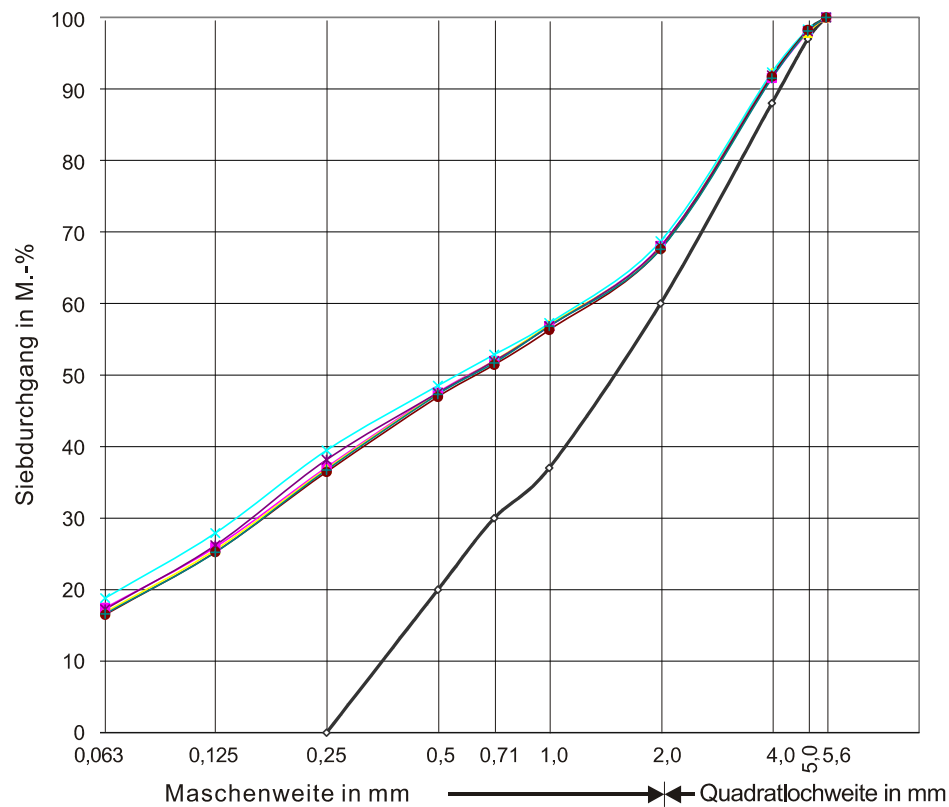


Abbildung 4-7: Korngrößenverteilung des Basalts 11 vor und nach Beanspruchung

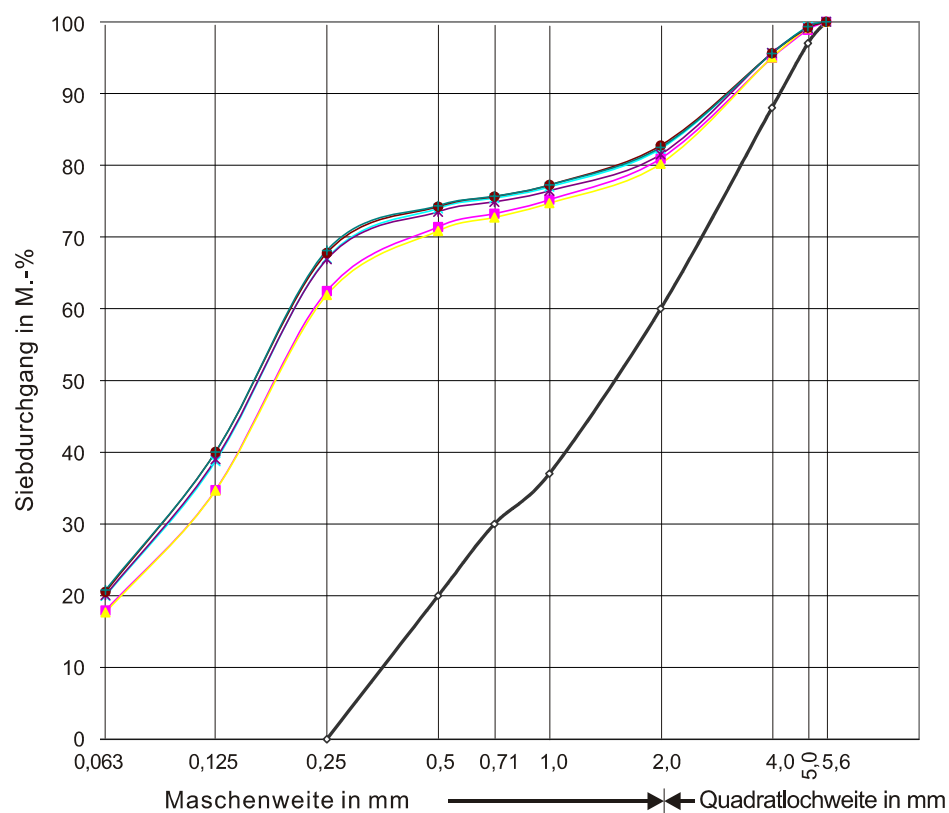


Abbildung 4-8: Korngrößenverteilung des Quarzits 17 vor und nach Beanspruchung

4.1.2.3 Zusammensetzung des Abriebs

Im oberen Abschnitt der Tabelle 4-3 sind die durch die Abriebbeanspruchung verursachten prozentualen Massenverluste je Kornklasse dargestellt. Die Verluste wurden auf die ursprüngliche Masse der entsprechenden Kornklasse vor Beanspruchung bezogen. Dabei wurden die angegebenen Mittelwerte aus den Ergebnissen aller Gesteinskörnungen berechnet.

Tabelle 4-3: Veränderung der Zusammensetzung der Probe durch Abriebbeanspruchung

Verluste durch Abrieb in M.-% bezogen auf ursprüngliche Masse der Kornklasse			
Kornklasse	Maximum	Minimum	arithmetisches Mittel
5,0 - 5,6	74,8	34,0	54,8
4,0 - 5,0	84,1	24,9	45,1
2,0 - 4,0	79,4	11,6	39,0
1,0 - 2,0	81,3	47,5	64,2
0,71 - 1,0	78,2	30,5	61,2
0,5 - 0,71	89,0	54,6	74,9
0,25 - 0,5	87,1	6,2	60,4
Zuwachs in M.-% bezogen auf ursprüngliche Masse der Probe (500 g) und in g			
Kornklasse	Maximum	Minimum	arithmetisches Mittel
0,125 - 0,25	27,8	7,2	17,2 (≈ 86 g)
0,063 - 0,125	21,2	6,6	14,3 (≈ 72 g)
0 - 0,063	36,8	10,8	22,3 (≈ 112 g)

Die Betrachtung der Mittelwerte zeigt, dass in allen Kornklassen die Abriebbeanspruchung zu deutlichen Massenverlusten und Bildung von Feinanteilen geführt hat. Insbesondere die feineren Körnungen < 2,0 mm mit einem Schwerpunkt auf der Kornklasse 0,5 bis 0,71 mm werden durch die Abriebbeanspruchung verfeinert. In diesen Körnungen wurden die deutlichsten Massenverluste festgestellt. Schwächer wirkt sich die Beanspruchung in der Kornklasse 2,0 bis 4,0 mm aus, hier wurden mit 39 M.-% die geringsten Verluste ermittelt.

Im unteren Abschnitt der Tabelle sind die Feinanteile je Kornklasse aufgeführt, die sich durch die Abriebbeanspruchung der Körnungen > 0,25 mm gebildet haben. Der Abrieb setzt sich mehrheitlich aus Feinanteilen der Kornklasse 0/0,063 mm (41 M.-%) zusammen, gefolgt von den Kornklassen 0,125/0,25 mm (32 M.-%) und 0,063/0,125 mm (27 M.-%).

Ausgehend von der Erkenntnis, dass der Verlust der Kornklasse 0,25/5,6 mm in Gramm exakt der nach Beanspruchung gewonnenen Masse der Kornklasse 0/0,25 mm entspricht, kann geschlossen werden, dass das abgeriebene Feinmaterial

im Größenbereich zwischen 0 bis 0,25 mm liegt.

Die beispielhaft in den Abbildungen 4-10 und 4-11 dargestellte Zusammensetzung der Probe des Kalksteins 1 vor und nach Beanspruchung verdeutlicht die Abriebleistung des MMD-Verfahrens. Die prozentualen Abnahmen der Anteile der Kornklassen $> 0,25$ mm sowie die dominierenden Anteile des Feinkorns 0/0,063 mm und 0,063/0,125 mm nach Beanspruchung lassen auf die Wirksamkeit der gewählten Reibladung und Prüfapparatur schließen.

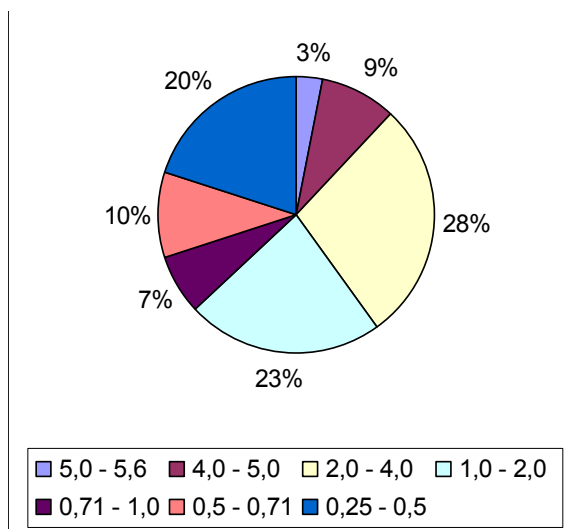


Abb. 4-9: Anteile der Kornklassen [M.-%] vor Beanspruchung (Beispiel Kalkstein 1)

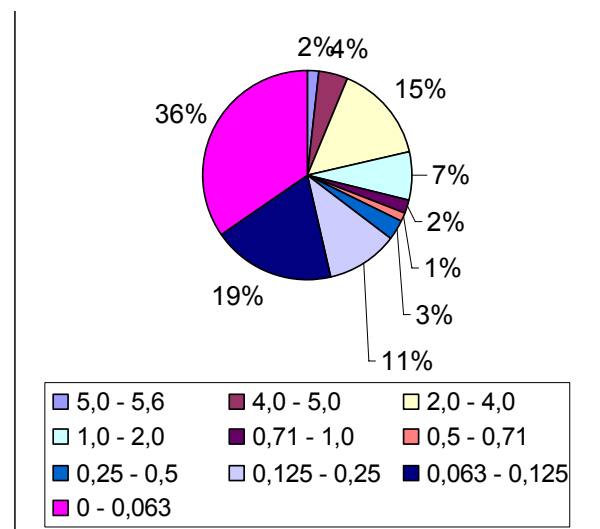


Abb. 4-10: Anteile der Kornklassen [M.-%] nach Beanspruchung (Beispiel Kalkstein 1)

4.1.3 Variation der Auswertungsmethoden

Die bisherige Auswertung des MMD-Verfahrens erfolgte über den Vergleich der Korngrößenverteilung der Probe vor und nach Abriebbeanspruchung. Der damit verbundene hohe Arbeits- und Zeitaufwand ist zum Zwecke einer wissenschaftlichen Betrachtung gerechtfertigt. Für eine praxisnahe Anwendung des Verfahrens in Prüflaboratorien ist eine vereinfachte Methode der Auswertung anzustreben, die folgende Anforderungen erfüllt:

- die Auswertung soll in der Berechnung eines Wertes je untersuchten Materials münden,
- ein maßgeblicher Verlust an Aussagekraft und Genauigkeit ist zu vermeiden,
- der ermittelte Wert soll Auskunft über die Eignung des untersuchten Materials zum Einsatz als Bettungs- oder Fugenmaterial geben,
- die Ergebnisse sollen den allgemeinen Erfahrungen hinsichtlich der Festigkeit von Baustoffen entsprechen.

Grundsätzlich werden zwei Methoden bei den in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren angewandt, mit deren Hilfe die Veränderung der ursprünglichen Probe beurteilt wird:

- Die Auswertung des Los Angeles-Verfahrens, des Micro-Deval-Verfahrens nach EN 1097-1 und des Deval-Verfahrens nach NF P 18-576 für feine Körnungen erfolgt über die Betrachtung des Siebdurchganges eines festgelegten Prüfsiebes. Der Durchgang wird auf die Gesamtmasse der Probe bezogen, so dass der berechnete Wert eine prozentuale Größe darstellt. Die Nennöffnungsweite des Prüfsiebs ist meist geringer als die Korndurchmesser der Probe und liegt bei den beschriebenen Verfahren im Bereich zwischen 0,1 und 1,6 mm. Demnach entspricht ein hoher Wert einer geringen mechanischen Beständigkeit.
- Die Prallprüfung in der Kugelmühle nach TP Min-StB berücksichtigt, wie in Kapitel 2 beschrieben, die Veränderung der Durchgänge durch insgesamt drei Prüfsiebe. Dazu wird die Differenz aus den Siebdurchgängen vor und nach Beanspruchung der Probe berechnet und über die Zahl der Prüfsiebe gemittelt. Der ermittelte Wert stellt eine mittlere Änderung des Durchgangs je betrachtetes Sieb dar.

Eine ähnliche Variante der Auswertung liegt bei der Bestimmung des Schlagzertrümmerungswertes nach EN 1097-2 vor. Der SZ-Wert wird aus der Summe der Siebdurchgängen durch fünf Prüfsiebe mit Öffnungsweiten zwischen 0,2 bis 8,0 mm und anschließender Mittelung berechnet.

Im Folgenden sollen entsprechend dieser Varianten für das MMD-Verfahren mehrere Möglichkeiten verglichen und beurteilt werden. Tabelle 4-4 enthält eine Übersicht über die unterschiedlichen Varianten.

Die Varianten „A“ bis „G“ entsprechen der Auswertung des Los Angeles- und Micro-Deval-Verfahrens sowie des Verfahrens nach NF P 18-576.

Der MMD-Koeffizient der Varianten „H“ bis „L“ wurde nach folgender Formel (5-1) berechnet:

$$\text{MMD} = \frac{\sum \text{Siebdurchgänge (nachher)} - \sum \text{Siebdurchgänge (vorher)}}{\text{Anzahl betrachtete Siebe}} \quad (5-1)$$

Dabei wird die Differenz aus den Durchgängen aller berücksichtigten Siebe vor und nach Abriebbeanspruchung gebildet und anschließend durch die Anzahl der berücksichtigten Siebe geteilt. Dadurch wird die durchschnittliche Änderung des Siebdurchgangs je berücksichtigtes Sieb bestimmt. Dieses Vorgehen entspricht dem Prinzip der Auswertung bei der Prallprüfung in der Kugelmühle und dem Schlagzertrümmerungsversuch.

Die Methoden „H“ bis „L“ unterscheiden sich lediglich durch die Auswahl und Anzahl

der jeweiligen Siebe.

Tabelle 4-4: Verschiedene Varianten der Auswertung des MMD-Verfahrens

Variante	Anzahl Siebe	Berücksichtigung der Durchgänge durch Siebe	Berechnung des MMD-Koeffizienten
[-]	[-]	[mm]	[-]
A	1	0,063	Durchgang _{Prüfsieb} /5
B	1	0,125	
C	1	0,25	
D	1	0,5	
E	1	0,71	
F	1	1,0	
G	1	2,0	
H	9	0,063 / 0,125 / 0,25 / 0,5 / 0,71 / 1,0 / 2,0 / 4,0 / 5,0	Formel
I	3	0,063 / 0,125 / 0,25	
J	3	0,125 / 0,25 / 0,71	
K	4	0,25 / 0,5 / 0,71 / 1,0	
L	2	0,25 / 2,0	

4.1.4 Ergebnisse der Methoden A bis L

In Abbildung 4-11 sind stellvertretend für die Auswertung mit einem Prüfsieb die Ergebnisse der nach Methode „A“ berechneten Werte dargestellt; hier werden die Durchgänge durch das 0,063-mm-Prüfsieb auf die Gesamtmasse der Probe (500 g) bezogen.

Die Werte weisen eine Spanne von 5,2 M.-% auf, wobei der höchste Wert 7,4 M.-%, der geringste 2,2 M.-% beträgt. Das arithmetische Mittel aller Werte beträgt 4,5 M.-%.

Die Abbildung zeigt, dass eine gute Differenzierung der Gesteinskörnungen vorliegt. Dies gilt für die Gesteinskörnungen generell als auch für einzelne Gesteine derselben Gesteinsart. Der Vergleich aller Körnungen zeigt, dass einige Materialien wie der dolomitische Kalkstein 1, der Kalkstein 4, die Grauwacken 5 und 7, der Rhyolith 15 sowie der rezyklierte Ziegel 22 hohe Werte über 6 M.-% aufweisen, wogegen abriebbeständigere Materialien wie der Diabas 8, der Basalt 11, der Rhyolith 14 und der RC-Beton 23 über geringe Werte um 3 M.-% verfügen.

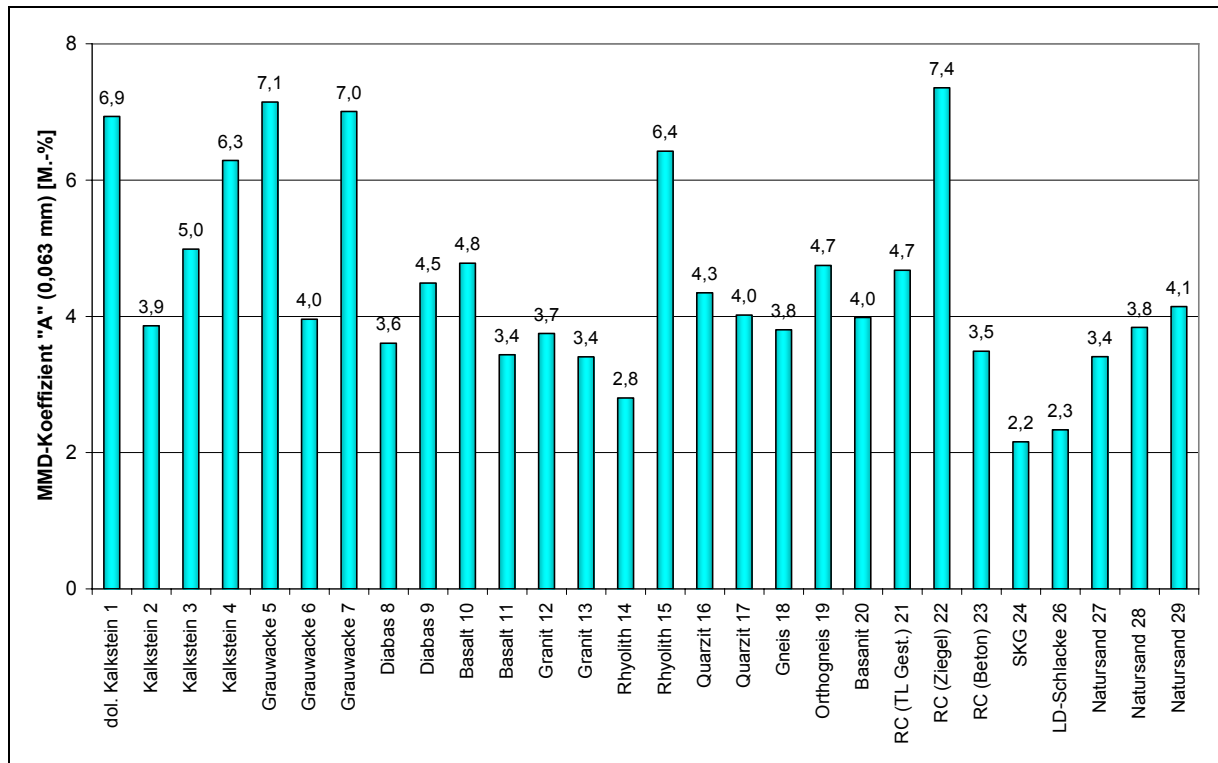


Abbildung 4-11: Auswertung MMD 0/5 nach Methode „A“ (Prüfsieb: 0,063 mm)

Innerhalb der Gesteinsarten sind Differenzierungen oder gleiche Beständigkeiten erkennbar. So weisen die Kalksteine 1 bis 4 deutlich abgestufte Werte zwischen 7,1 bis 3,9 M.-% auf. Die Werte der Granite 12 und 13 weichen geringfügig von einander ab.

In Abbildung 4-12 sind die nach Methode „E“ mit dem 0,71-mm-Prüfsieb ermittelten Werte dargestellt.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Differenzierung der Materialien mit zunehmender Öffnungsweite des Prüfsiebes tendenziell abnimmt. Der Unterschied zwischen den Werten der Kalksteine 1 und 2 sinkt z. B. von etwa 4 M.-% bei den feineren Prüfsieben auf 1,5 M.-% bei der Auswertung mit dem 2,0 mm-Prüfsieb.

Auffällig ist die Einstufung der Grauwacken 5 und 7, deren Abriebwiderstand mit zunehmender Größe des Prüfsiebes im Vergleich zu den anderen Materialien wächst.

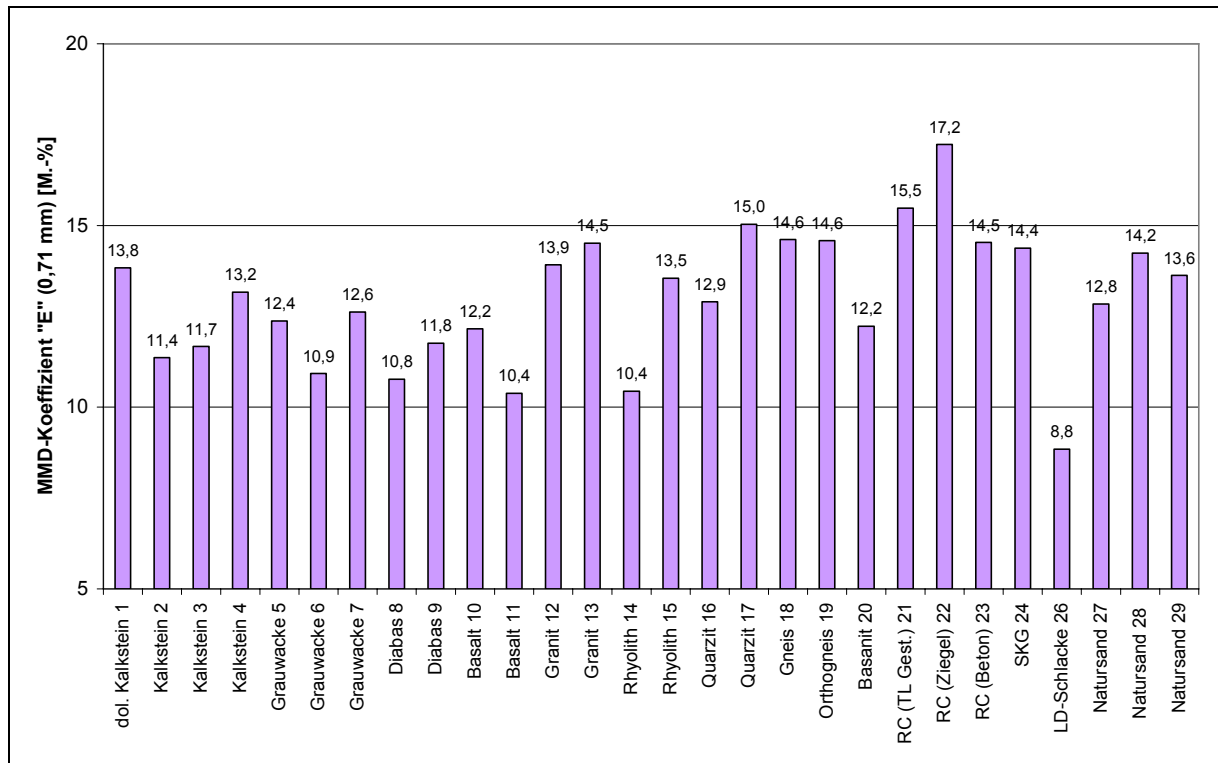


Abbildung 4-12: Auswertung MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „E“ (Prüfsieb: 0,71 mm)

Die Auswertung nach Methode „H“ beruht auf der Betrachtung der Durchgänge aller 9 Prüfsiebe, die beim MMD-Verfahren zur Anwendung kommen. Die Berücksichtigung aller Prüfsiebe zur Berechnung des Ergebnisses stellt eine Parallele zum Kugelmühlen-Verfahren dar, wobei hier abweichend eine deutlich höhere Anzahl an Prüfsieben vorliegt.

Die in Abbildung 4-13 dargestellten Ergebnisse nach Methode „H“ weisen eine gute Differenzierung auf. Die Werte beinhalten eine Spanne von 30,1 M.-%, wobei das arithmetische Mittel aller Werte 27,2 M.-% beträgt.

Zur Berechnung der Werte mit der Methode „J“ werden die Prüfsiebe mit den Öffnungsweiten 0,125 / 0,25 / 0,71 mm verwendet, welche etwa den drei Prüfsieben des Kugelmühlen-Verfahrens entsprechen. Die in Abbildung 4-14 dargestellten Werte liegen in einem Bereich von 20,1 bis 62,4 M.-%; das arithmetische Mittel beträgt 41,8 M.-%. Die zuvor beschriebene Differenzierung innerhalb der Gesteinsarten bleibt auch nach Methode „J“ erhalten, wie beispielsweise an den Werten der Kalksteine und der Grauwacken ersichtlich wird.

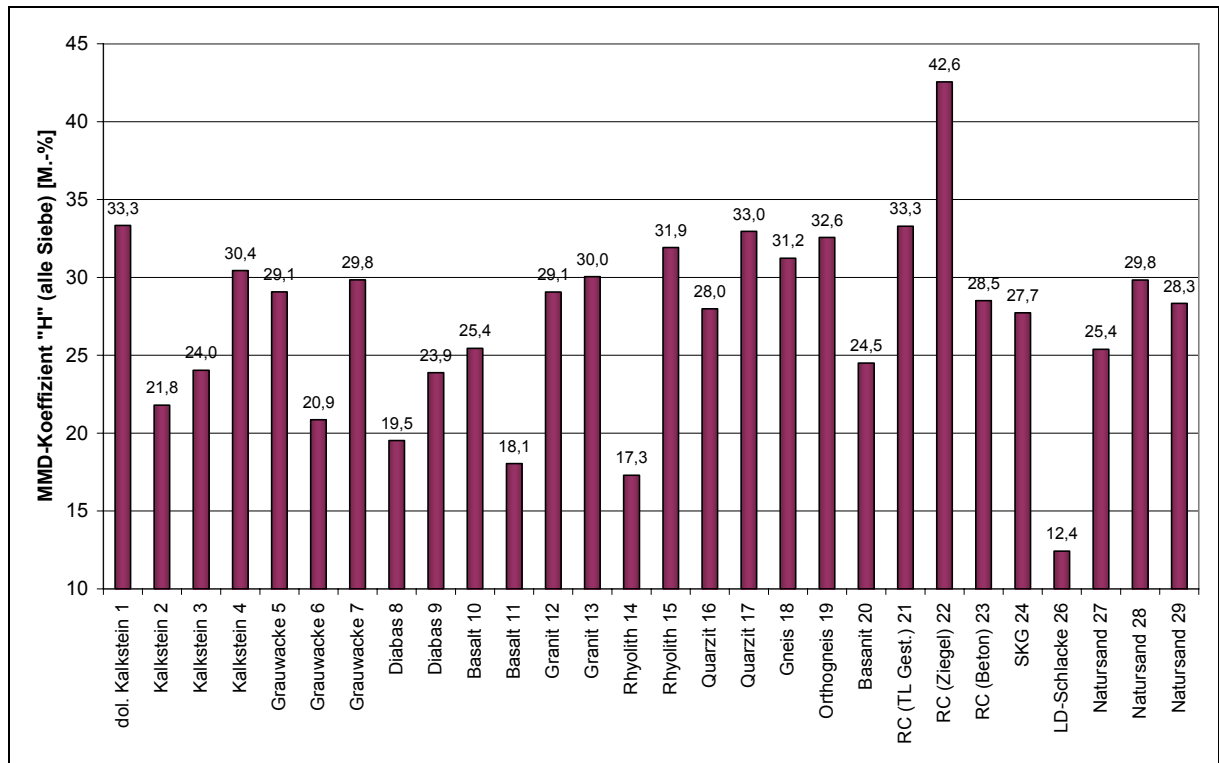


Abbildung 4-13: Auswertung MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „H“ (alle Prüfsiebe)

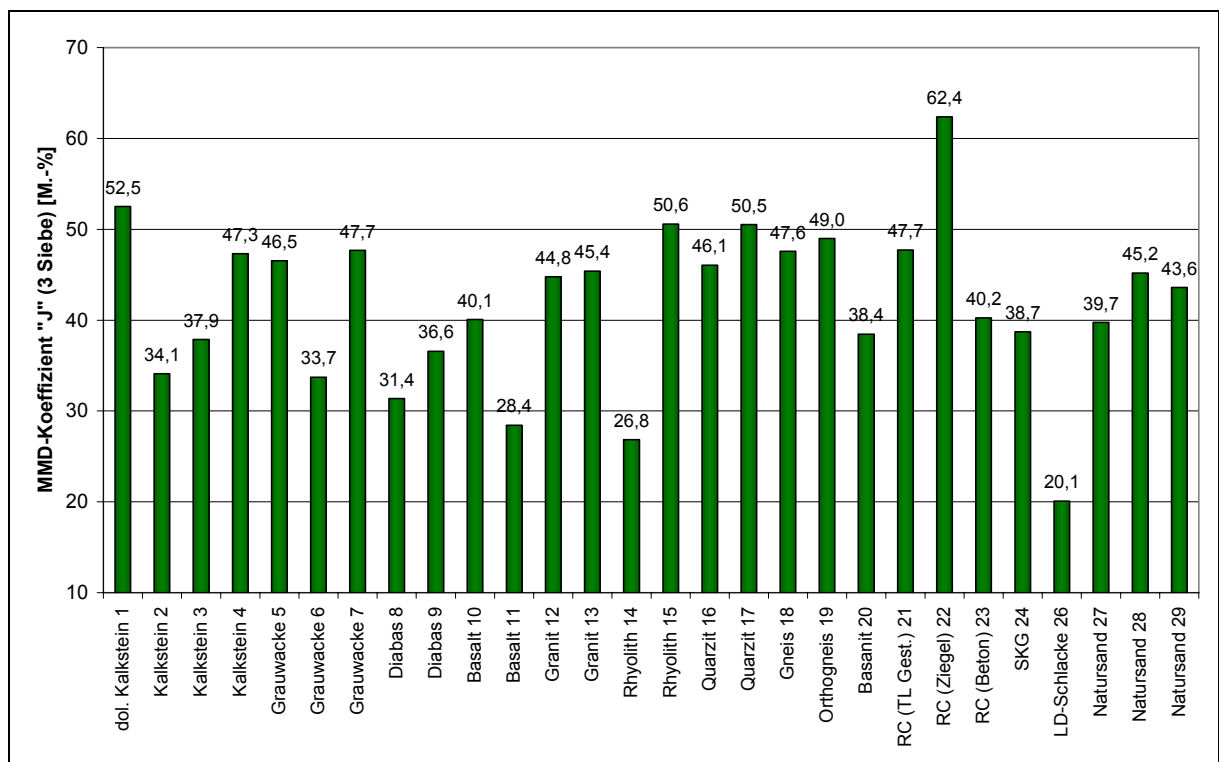


Abbildung 4-14: Auswertung MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „J“ (3 Prüfsiebe)

Der Vergleich der Abbildungen 4-11 bis 4-14 zeigt, dass auch bei den Methoden mit mehreren Prüfsieben eine gute Differenzierung erreicht wird. Sowohl die Unterscheidung der Materialien insgesamt als auch der Materialien einer Gesteinsart kann in befriedigendem Maße vorgenommen werden.

In Tabelle 4-5 sind die Gesteinskörnungen nach ihren ermittelten Abriebfestigkeiten nach dem MMD-Verfahren aufsteigend in Abhängigkeit von der jeweiligen Methode der Auswertung aufgelistet.

Tabelle 4-5: Reihung der Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Methode der Auswertung

Reihung (Platz)	A	B	C	E	H	I	J	L
1	SKG 24	LDS 26	LDS 26	LDS 26	LDS 26	LDS 26	LDS 26	LDS 26
2	LDS 26	RHY 14	RHY 14	B 11	RHY 14	RHY 14	RHY 14	RHY 14
3	RHY 14	SKG 24	B 11	RHY 14	B 11	B 11	B 11	B 11
4	GR 13*	B 11	D 8	D 8	D 8	SKG 24	D 8	D 8
5	NS 27*	D 8	K 2	GW 6	GW 6	D 8	GW 6	GW 6
6	B 11*	RCB 23	GW 6	K 2	K 2	K 2	K 2	K 2
7	RCB 23	K 2	D 9	K 3	D 9	RCB 23	D 9	K 3
8	D 8	GW 6	K 3	D 9	K 3	GW 6	K 3	D 9
9	GR 12	NS 27	RCB 23	B 10	BS 20	NS 27	BS 20	BS 20
10	GN 18	D 9	SKG 24	BS 20	NS 27	D 9	SKG 24	B 10
11	NS 28	GR 13	BS 20	GW 5	B 10	BS 20	NS 27	NS 27
12	K 2	BS 20	B 10	GW 7	SKG 24	K 3	B 10	GW 5
13	GW 6	NS 28	NS 27	NS 27	Q 16	GR 13	RCB 23	RCB 23
14	BS 20	GR 12	NS 29	Q 16	NS 29	NS 29	NS 29	GW 7
15	Q 17	NS 29	GW 5	K 4	RCB 23	B 10	GR 12	NS 29
16	NS 29	K 3	GW 7	RHY 15	GR 12	GR 12	NS 28	Q 16
17	Q 16	RCTL21	GR 12	NS 29	GW 5	NS 28	GR 13	SKG 24
18	D 9	B 10	RCTL21	K 1	NS 28	GN 18	Q 16	K 4
19	RCTL21	GN 18	NS 28	GR 12	GW 7	RCTL21	GW 5	GR 12
20	OGN 19	Q 17	K 4	NS 28	GR 13	Q 16	K 4	RHY 15
21	B 10	OGN 19	GR 13	SKG 24	K 4	Q 17	GN 18	NS 28
22	K 3	Q 16	Q 16	GR 13	GN 18	OGN 19	GW 7	GR 13
23	K 4	K 4	GN 18	RCB 23	RHY 15	K 4	RCTL21	GN 18
24	RHY 15	GW 5	OGN 19	OGN 19	OGN 19	GW 5	OGN 19	K 1
25	K 1	RHY 15	RHY 15	GN 18	Q 17	GW 7	Q 17	RCTL21
26	GW 7	GW 7	K 1	Q 17	RCTL21	RHY 15	RHY 15	OGN 19
27	GW 5	K 1	Q 17	RCTL21	K 1	K 1	K 1	Q 17
28	RCZ 22	RCZ 22	RCZ 22	RCZ 22	RCZ 22	RCZ 22	RCZ 22	RCZ 22

* Gesteinskörnungen weisen nach Rundung auf eine Nachkommastelle identische Werte auf

Die Übersicht der verschiedenen Verfahren zeigt, dass unabhängig von der Methode der Auswertung Gesteinskörnungen wie die LD-Schlacke 26, der Rhyolith 14 oder der Basalt 11 als hoch abriebbeständig eingestuft, während der RC Ziegel oder der Kalkstein 1 durchgängig als Material mit geringem Abriebwiderstand auf den letzten Plätzen der Reihung eingeordnet sind. Das in der Tabelle grau hinterlegte SKG 24 steht beispielhaft für ein Material, dessen Beurteilung direkt von der gewählten Me-

thode der Auswertung abhängt. So erfolgt nach der Methode „A“ die Einstufung des SKG 24 als das insgesamt beständigste Material, wogegen andere Methoden die Abriebfestigkeit des SKG 24 im Vergleich zu den weiteren untersuchten Körnungen als weitaus geringer bewerten.

4.2 MMD-Verfahren 0/2

- Versuchsbeschreibung

Ergänzend zu den Untersuchungen der Körnung 0,25/5,6 mm wurden von sieben ausgewählten Materialien die feinen Gesteinskörnungen 0/2 mm mit dem MMD-Verfahren untersucht. Dazu wurden die Proben nach den in Kapitel 2 erläuterten Vorgaben der TP Min-StB für das Kugelmühlen-Verfahren zusammengesetzt. Abweichend hiervon wurde eine dem MMD-Verfahren 0/5 entsprechende Gesamtmasse der Probe von 500 g gewählt. Die Reibladung bestand aus den im MMD-Verfahren 0/5 verwendeten Stahlkugeln; die Wasserzugabe betrug 2,5 l.

Zur Beurteilung des Einflusses der Anzahl der Umdrehungen wurden die Versuche jeweils mit 500 und 1500 U/min durchgeführt. Je Material und Umdrehungszahl wurden zwei Einzelprüfungen vorgenommen und die Werte gemittelt.

- Ergebnisse

Die in den Bildern 4-5 und 4-6 exemplarisch für die Gesamtmenge der untersuchten Körnungen dargestellten Proben der Grauwacke 7 zeigen eine stärkere Zermahlung bei einer Belastung mit 1500 Umdrehungen.



Bild 4-5: GW 7 nach 500 U



Bild 4-6: GW 7 nach 1500 U

In den Tabellen 4-6 und 4-7 sind die Ausgangssieblinien und die Siebdurchgänge nach Beanspruchung in Abhängigkeit von der Anzahl der Umdrehungen dargestellt. Zusätzlich wurde in Anlehnung an die TP Min-StB der Abriebwert A_{KM} berechnet, der zur hier besseren Unterscheidung als $A_{KM(MMD)}$ bezeichnet wird.

Die in Tabelle 4-6 aufgeführten Werte zeigen eine deutliche Verfeinerung des ursprünglichen Materials, welche an den gestiegenen Siebdurchgängen zu erkennen ist. Der durch die Beanspruchung erzeugte Feinkornanteil 0/0,063 mm beträgt in Abhängigkeit von der betrachteten Gesteinskörnung zwischen 5,2 und 13,8 M.-%.

Tabelle 4-6: MMD 0/2, 500 Umdrehungen

Gesteinsart	Durchgang in M.-% nach Abriebbeanspruchung für die jeweiligen Analysesiebe (Nennöffnungsweite in mm)								$A_{KM(MMD)}$
	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	[M.-%]
Zusammensetzung vor Abrieb		0		20		60		100	0
Kalkstein 1	13,6	17,8	28,7	55,0	73,2	80,2	86,1	99,6	24,3
Kalkstein 3	10,6	13,5	21,3	43,6	64,8	74,7	83,3	99,7	17,3
Grauwacke 7	13,8	18,7	26,9	48,2	66,0	74,8	81,6	99,1	20,6
Diabas 9	8,1	10,4	16,0	37,7	60,3	73,4	83,0	99,8	13,8
Rhyolith 14	5,7	7,1	13,8	33,9	58,5	71,5	82,2	100,0	10,8
RC Ziegel 22	12,8	15,4	23,2	49,0	78,3	87,2	92,6	99,5	23,9
Natursand 28	5,2	7,2	11,9	40,1	70,0	81,2	90,3	99,9	16,2

Tabelle 4-7: MMD 0/2, 1500 Umdrehungen

Gesteinsart	Durchgang in M.-% nach Abriebbeanspruchung für die jeweiligen Analysesiebe (Nennöffnungsweite in mm)								$A_{KM(MMD)}$
	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	[M.-%]
Zusammensetzung vor Abrieb		0		20		60		100	0
Kalkstein 1	35,7	47,7	65,8	88,8	91,8	92,9	94,5	99,3	49,8
Kalkstein 3	27,7	35,9	48,7	73,9	84,2	88,2	92,0	99,7	39,3
Grauwacke 7	40,4	53,1	68,6	86,4	89,2	90,6	92,8	99,3	50,0
Diabas 9	22,3	28,9	39,1	66,6	81,9	87,2	91,6	99,8	34,2
Rhyolith 14	16,0	20,2	30,9	58,7	77,3	84,2	90,0	99,9	27,7
RC Ziegel 22	31,3	39,1	54,4	90,1	96,2	96,9	97,6	99,1	48,7
Natursand 28	16,3	23,5	35,0	78,8	92,7	94,6	96,5	99,6	39,0

Die Werte erlauben eine gute Differenzierung der untersuchten Gesteinskörnungen. Die berechneten Abriebwerte $A_{KM(MMD)}$ weisen eine Spanne von 13,5 M.-% auf und

liegen in einem Bereich zwischen 10,8 und 24,3 M.-%.

Entsprechend der höheren Umdrehungszahl wurde eine vermehrte Zerkleinerung der Proben festgestellt. Der Anteil an Feinkorn 0/0,063 mm ist im Vergleich dreimal so hoch gegenüber den mit 500 Umdrehungen belasteten Proben.

Im Unterschied zu den Ergebnissen bei 500 Umdrehungen nimmt nach 1500 Umdrehungen die Differenzierung der Gesteinskörnungen im Hinblick auf die Abriebwerte $A_{KM(MMD)}$ ab. Körnungen wie der Kalkstein 1, die Grauwacke 7 und der RC Ziegel 22 weisen einen Abriebwert von etwa 50 M.-% auf; die Abriebwerte des Kalksteins 3 und des Natursandes 28 weichen nur 0,3 M.-% voneinander ab. Die Betrachtung der Durchgänge bestimmter Prüfsiebe erlaubt eine leichtere Differenzierung, ergeben jedoch eine zu den Abriebwerten $A_{KM(MMD)}$ abweichende Reihung der Körnungen.

4.3 Kugelmühlen-Verfahren 0/5

- Versuchsbeschreibung

Neben dem Micro-Deval-Verfahren wurde die Anpassung des Kugelmühlen-Verfahrens nach TP Min-StB zur Prüfung von Proben der Körnung 0/5 mm untersucht. Da die TP Min-StB die Zusammensetzung der Proben mit einem Größtkorndurchmesser von 2 mm vorsah, wurde diese Vorgabe außer Kraft gesetzt. Gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.1.1.3 wurden die Proben 0,25/5,6 mm nach den Vorgaben für das MMD-Verfahren 0/5 mit einer Gesamtmasse von 100 g zusammengesetzt. Ansonsten wurde die Prüfung nach den identischen Rahmenbedingungen der Prallprüfung an Sand nach TP Min-StB belastet. Es wurden sieben ausgewählte Gesteinsarten untersucht.

- Ergebnisse

Die Bilder 4-7 bis 4-10 zeigen die Proben im ursprünglichen Zustand und nach Belastung in der Kugelmühle. Die Feinkornanreicherung bei dem Kalkstein 1 und dem Rhyolith 14 ist augenscheinlich zu erkennen.



Bild 4-7: Kalkstein 1 vor Beanspruchung

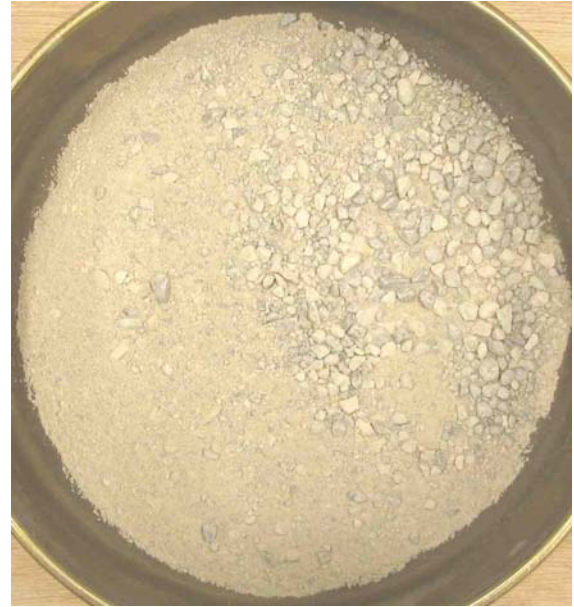


Bild 4-8: Kalkstein 1 nach Beanspruchung



Bild 4-9: Rhyolith 14 vor Beanspruchung



Bild 4-10: Rhyolith 14 nach Beanspruchung

In Tabelle 4-8 sind die Siebdurchgänge in Abhängigkeit vom jeweiligen Prüfsieb vor und nach Beanspruchung dargestellt. Die Werte zeigen, dass durch die Beanspruchung eine Verfeinerung der Probe stattgefunden hat, die sich in der Zunahme aller Siebdurchgänge widerspiegelt. Die Anreicherung von Feinkorn 0/0,063 mm fällt mit Werten zwischen 1,4 bis 6,7 M.-% im Vergleich zu anderen Verfahren wie dem MMD-Verfahren 0/2 deutlich geringer aus. Eine Differenzierung der Körnungen nach ihrer Festigkeit ist jedoch gut durchführbar.

Tabelle 4-8: Ergebnisse der Untersuchung Kugelmühle an Proben 0,25/5,6 mm

Gesteinsart	Durchgang in M.-% nach Abriebbeanspruchung für die jeweiligen Analysesiebe (Nennöffnungsweite in mm)								
	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0
Zusammensetzung vor Abrieb	0	0	0	20	30	37	60	88	97
Kalkstein 1	6,3	16,9	28,9	44,8	50,0	55,8	68,6	89,5	97,4
Kalkstein 3	5,2	10,3	18,5	36,1	42,0	49,6	64,1	88,9	96,9
Grauwacke 7	3,3	5,9	12,1	31,6	38,0	45,7	64,6	88,6	96,6
Diabas 9	4,1	7,2	13,8	33,9	40,6	49,7	67,1	89,9	96,9
Rhyolith 14	1,4	4,6	11,4	30,3	36,8	43,9	62,7	88,8	96,6
RC Ziegel 22	6,7	16,7	27,8	49,5	56,1	63,2	77,8	91,9	98,1
Natursand 28	3,4	8,1	16,9	39,6	46,8	53,7	66,3	88,0	96,6

4.4 Modifiziertes Proctor-Verfahren

- Versuchsbeschreibung

Die zur Untersuchung von Bettungsmaterial angepassten Kugelmühlen- und Micro-Deval-Verfahren beruhen auf dem Prinzip der mahlenden und reibenden Beanspruchung. Als Ergänzung des ursprünglichen Versuchsprogramms wurde ein weiteres Verfahren mit schlagender Beanspruchung zur Prüfung der Kornverfeinerung erprobt. Dazu wurde eine Probe 0,25/5,6 mm entsprechend dem Vorgehen beim MMD-Verfahren zusammengesetzt und mit der Apparatur des herkömmlichen Proctor-Verfahrens nach EN 13286-2 [53] schlagend beansprucht.

Abweichend von den Vorgaben nach [53] wurde die trockene Probe einschichtig mit einer Einbauhöhe von $4 \pm 0,2$ cm in den Proctortopf A mit einem Durchmesser von 100 mm eingebaut. Nach Aufsetzen der Stahlplatte erfolgte die Belastung in Form von 40 Schlägen mit dem Proctor-Hammer ($m = 2,5$ kg). Anschließend wurde die Korngrößenverteilung der belasteten Probe bestimmt.

- Ergebnisse

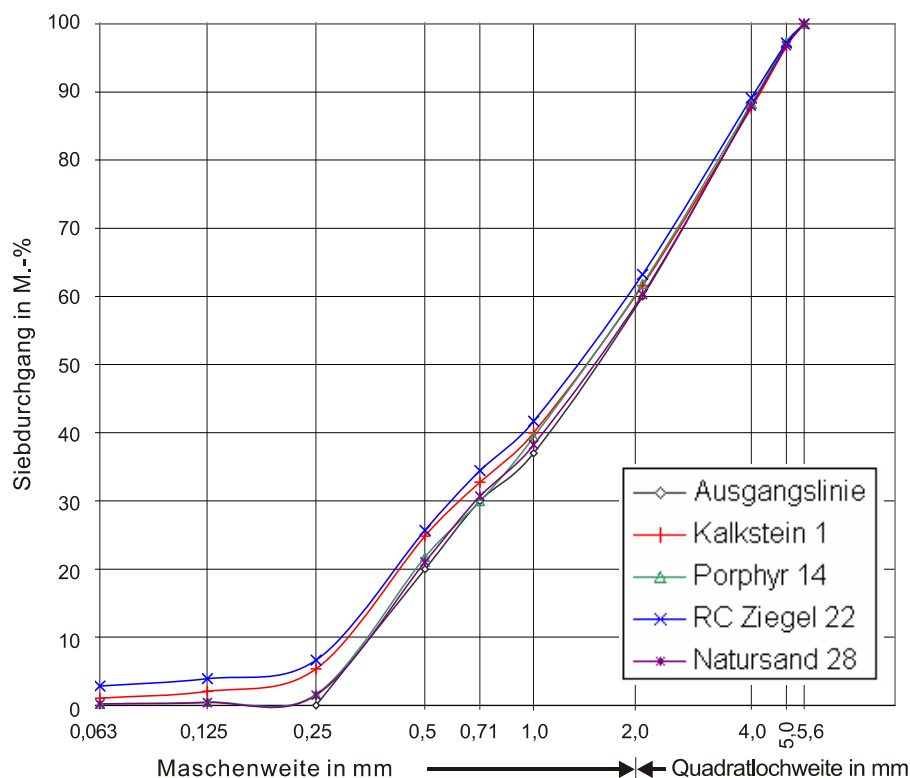
In Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse in Form der Siebdurchgänge vor und nach Beanspruchung aufgeführt.

Die Durchgänge des 0,063-mm-Siebes liegen bei den Materialien Rhyolith 14 und Natursand 28 bei 0,2 M.-%, wogegen bei dem Kalkstein 1 und dem RC Ziegel 22 Werte zwischen 1,1 bis 2,8 M.-% festgestellt wurden.

Tabelle 4-9: Ergebnisse des modifizierten Proctor-Verfahrens 0,25/5,6

Gesteinsart	Durchgang in M.-% nach Abriebbeanspruchung für die jeweiligen Analysesiebe (Nennöffnungsweite in mm)								
	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0
Zusammen- setzung vor Abrieb	0	0	0	20	30	37	60	88	97
Kalkstein 1	1,1	2,1	5,4	24,9	32,8	40,0	61,6	87,7	96,7
Rhyolith 14	0,2	0,5	1,7	21,8	30,0	39,4	61,9	88,3	97,4
RC Ziegel 22	2,8	3,9	6,7	25,7	34,5	41,7	63,3	89,1	97,2
Natursand 28	0,2	0,4	1,5	21,1	30,7	38,3	60,3	87,9	96,8

Abbildung 4-15 zeigt, dass die Kornzerkleinerung im Vergleich zu dem MMD-Verfahren und dem Kugelmühlen-Verfahren wesentlich geringer ausfällt. Die Abweichungen von der Ausgangskorngrößenverteilung (schwarz) fallen bei den Materialien mit höherer Schlagfestigkeit, wie dem Rhyolith 14 und dem Natursand 28, sehr gering aus.

**Abbildung 4-15:** Korngrößenverteilung vor und nach Beanspruchung beim modifizierten Proctor-Verfahren

Dennoch entsprechend die Werte den allgemeinen Erfahrungen. Die Reihung der Materialien ergibt, dass der RC-Ziegel 22 und der Kalkstein 1 eine erwartungsgemäß stärkere Kornzerkleinerung erfahren als die beiden weiteren Materialien.

5 Deutung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen

5.1 Untersuchung der Korrelationen zwischen den Verfahren

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Prüfverfahren näher untersucht. Die Auswertung soll Aufschluss darüber geben, ob sich Materialien z. B. bei reinen Abriebprüfungen gleich verhalten. Aufgrund der vielfältigen Auswertemöglichkeiten sind umfangreiche Korrelationsuntersuchungen erforderlich.

5.1.1 Allgemeines zur Berechnung und deren Darstellung

Zur fundierten Beurteilung des Zusammenhanges der Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren und Auswertungsmethoden eignet sich die statistische Betrachtung der Ergebnisse.

Die Methoden der Statistik sind ein fester Bestandteil in den empirisch arbeitenden Wissenschaften zur Interpretation von Untersuchungsergebnissen. Dabei beschäftigt sich der Zweig der Korrelationsrechnung mit der Überprüfung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten mehrerer Merkmale einer Untersuchungseinheit. Untersuchungseinheiten können Objekte sein, an denen Messungen vorgenommen werden. Unter dem Begriff „Merkmal“ wird die Größe, auf die sich die Messungen beziehen, verstanden. Im vorliegenden Fall stellen die Gesteinskörnungen die Untersuchungseinheiten dar und die Merkmale entsprechen den Ergebnissen der verschiedenen Verfahren. Auf die Untersuchungen bezogen bedeutet dies, dass bei der Bestimmung des Los Angeles-Koeffizienten von Kalkstein 4 der Los Angeles – Koeffizient das Merkmal und Kalkstein 4 die Untersuchungseinheit darstellt. Das jeweilige Ergebnis in Form eines Zahlenwertes wird als Ausprägung des Merkmals bezeichnet.

Es liegen demnach 29 Untersuchungseinheiten in Form von Gesteinskörnungen vor, die n Merkmale aufweisen. Dabei entspricht „ n “ der Zahl der verwendeten Verfahren. Mit den Methoden der Korrelationsrechnung sollen die Zusammenhänge zwischen den Werten unterschiedlicher Verfahren ermittelt werden.

Die Überprüfung der Stärke des Zusammenhanges kann vereinfachend mit Hilfe der Berechnung des Korrelationskoeffizienten r_{XY} nach Pearson erfolgen. Die Variablen X und Y stehen für zwei Merkmale einer Untersuchungseinheit, deren Abhängigkeit überprüft werden soll. Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen, wobei Beträge, die sich der 1 nähern für einen starken Zusammenhang stehen und Werte, die nahe Null liegen, einem schwachen Zusammenhang entsprechen. Die Berechnungen beruhen vereinfacht auf der Annahme eines linearen Zusammenhanges.

Da mehrere Merkmale X_1, X_2, \dots, X_n vorliegen, werden die geschätzten Korrelationen

in einer Korrelationsmatrix R zusammengefasst.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{x_1x_2} & \cdots & r_{x_1x_n} \\ r_{x_1x_n} & 1 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & r_{x_{n-1}x_n} \\ r_{x_nx_n} & \cdots & r_{x_{n-1}x_n} & 1 \end{bmatrix}$$

Die Korrelationen wurden mit der Software STATISTIKA, Version 7.1 der Firma StatSoft, USA berechnet.

Es liegen aufgrund von zu geringen Korndurchmessern der untersuchten Materialien nicht für jedes Verfahren Werte aller Gesteinskörnungen vor. So sind beispielsweise für die Durchführung des LA- und des MD- Verfahrens Körnungen mit einem Durchmesser von 10 bis 14 mm erforderlich, die bei vier der Materialien nicht vorhanden waren. Weiterhin konnten bei acht Materialien der SZ-Wert nicht ermittelt werden, da wie im Fall der RC-Baustoffe keine entsprechenden Untersuchungen durchgeführt wurden. Für 21 der insgesamt 29 Materialien sind die Werte aller Verfahren bekannt.

Weitere Interpretationsmöglichkeiten ergeben sich durch die Unterteilung der Gesamtmenge der untersuchten Gesteinskörnungen in Untergruppen ähnlicher Genese. Tabelle 5-1 enthält die vorgenommene Gruppierung und deren zugrunde liegenden Kriterien.

Tabelle 5-1: Einteilung der untersuchten Gesteine in Gruppen

Gruppen-Nr.	Gruppenname	Gestein	Bezeichnung
1	Karbonatgesteine	Kalkstein, dolomiti-scher Kalkstein	KS 1 bis 4
2	quarzreiche magmati-sche Gesteine	Granit, Rhyolith	GR 12 und 13, RHY 14 und 15
3	quarzarme magmatische Gesteine	Diabas, Basalt, Basanit	D 8 und D 9, B 10 und B 11, BS 20
4	quarzreiche Sedimente	Grauwacken	GW 5 bis 7
5	quarzreiche metamor-phe Gesteine	Quarzit, Gneis	Q 16 und 17, GN 18, OGN 19
6	RC-Baustoffe	RC TL-Gestein, RC-Ziegel, RC-Beton	RCTL 21, RCZ22, RCB 23
7	Industrielle Nebenpro-dukte	SKG, Hüttensand, LD-Schlacke	SKG 24, HS 25, LDS 26
8	Natursande	Natursande	NS 27 bis 29

5.1.2 Korrelation zwischen den Ergebnissen der Methoden A bis L (MMD 0/5)

Die in Tabelle 5-2 aufgeführte Matrix beinhaltet die Beziehungen zwischen den Ergebnissen des MMD-Verfahrens unter Variation der Auswertung.

Tabelle 5-2: Korrelationsmatrix (MMD 0/5 A bis L)

Variable	Korrelationen MMD 0/5 Verfahren A bis L Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$											
	MMD A	MMD B	MMD C	MMD D	MMD E	MMD F	MMD G	MMD H	MMD I	MMD J	MMD K	MMD L
MMD A	1,00	0,94	0,63	0,38	0,33	0,29	0,24	0,61	0,90	0,69	0,43	0,51
MMD B	0,94	1,00	0,83	0,59	0,53	0,48	0,40	0,78	0,99	0,86	0,63	0,70
MMD C	0,63	0,83	1,00	0,92	0,88	0,85	0,78	0,97	0,90	0,99	0,94	0,97
MMD D	0,38	0,59	0,92	1,00	0,99	0,98	0,95	0,96	0,71	0,92	1,00	0,98
MMD E	0,33	0,53	0,88	0,99	1,00	1,00	0,97	0,94	0,66	0,88	0,99	0,97
MMD F	0,29	0,48	0,85	0,98	1,00	1,00	0,98	0,92	0,61	0,85	0,98	0,95
MMD G	0,24	0,40	0,78	0,95	0,97	0,98	1,00	0,88	0,54	0,78	0,94	0,91
MMD H	0,61	0,78	0,97	0,96	0,94	0,92	0,88	1,00	0,87	0,98	0,98	0,99
MMD I	0,90	0,99	0,90	0,71	0,66	0,61	0,54	0,87	1,00	0,93	0,75	0,81
MMD J	0,69	0,86	0,99	0,92	0,88	0,85	0,78	0,98	0,93	1,00	0,94	0,97
MMD K	0,43	0,63	0,94	1,00	0,99	0,98	0,94	0,98	0,75	0,94	1,00	0,99
MMD L	0,51	0,70	0,97	0,98	0,97	0,95	0,91	0,99	0,81	0,97	0,99	1,00

Die Korrelationskoeffizienten zeigen, dass erwartungsgemäß die Abhängigkeit zwischen Methoden, die Prüfsiebe mit gleichen oder ähnlichen Nennöffnungsweiten zur Berechnung der Ergebnisse verwenden, vergleichsweise stark ausgeprägt ist. So lassen sich starke Korrelationen zwischen Methoden mit „benachbarten“ Prüfsieben, wie z. B. bei den Ergebnissen der Methoden „A“ und „B“ erklären.

Der Einfluss des jeweiligen Prinzips der Auswertung (Einzelsieb / mehrere Siebe) ist eher gering ausgeprägt, wie die Korrelationskoeffizienten zwischen den Methoden „B“ und „I“ zeigen.

5.1.3 Korrelation zwischen MMD 0/5- und SZ-, LA- und MD-Verfahren

In Tabelle 5-3 sind die Korrelationskoeffizienten r_{ij} für das SZ-, das LA- und das MD-Verfahren sowie das MMD-Verfahren in Abhängigkeit von der Methode der Auswertung aufgeführt.

Dabei stehen die Abkürzungen „SZ“ für das Schlagzertrümmerungsverfahren, „LA“ für das Los Angeles-Verfahren nach DIN EN 1097-2 und „MD“ für das Micro-Deval-Verfahren nach DIN EN 1097-1. Die Ziffern „A“ bis „L“ entsprechen der Auswertung des MMD-Verfahrens gemäß Tabelle 4-4.

Grundsätzlich lassen sich keine signifikanten Korrelationen feststellen. Die

Abhängigkeiten zwischen dem MMD-Verfahren und den SZ-, LA- und MD-Verfahren sind mit $r \leq 0,61$ schwach ausgeprägt, wie Tabelle 5-3 zeigt.

Tabelle 5-3: Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. SZ, LA und MD-Verfahren

Variable	Korrelationen MMD 0/5 vs SZ 8/12, LA 10/14 und MD 10/14 Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$											
	MMD A	MMD B	MMD C	MMD D	MMD E	MMD F	MMD G	MMD H	MMD I	MMD J	MMD K	MMD L
SZ	0,20	0,35	0,49	0,52	0,53	0,55	0,56	0,51	0,39	0,48	0,52	0,53
LA	-0,10	0,02	0,31	0,51	0,56	0,59	0,61	0,40	0,11	0,32	0,49	0,43
MD	0,53	0,42	0,23	0,16	0,15	0,14	0,19	0,30	0,40	0,29	0,18	0,22

In Tabelle 5-4 ist die Korrelationsmatrix für die Ergebnisse des SZ-, LA-, MD- und Kugelmühlen-Verfahrens dargestellt. Anhand der ermittelten Koeffizienten wird ersichtlich, dass zwischen den Ergebnissen der hier behandelten primär schlagenden Verfahren wie dem LA- und dem SZ-Verfahren einerseits und dem primär reibenden/mahlenden MD-Verfahren andererseits kein signifikanter Zusammenhang besteht. Dagegen konnten die in Kapitel 2 erläuterte Korrelation der Werte des SZ-Verfahrens und des LA-Verfahrens durch einen Koeffizienten von $r = 0,94$ bestätigt werden. Das Kugelmühlen-Verfahren korreliert nicht mit dem MD-Verfahren und weist eine schwach ausgeprägte Korrelation ($r = 0,61$) zu dem SZ-Verfahren auf. Der Zusammenhang zwischen dem Kugelmühlenverfahren und dem LA-Verfahren ist durch einen erwartungsgemäß geringen Koeffizient von $r = 0,33$ gekennzeichnet.

Tabelle 5-4: Korrelationsmatrix SZ, Kugelmühle (AKM), LA und MD

Variable	Korrelationen SZ, AKM, LA, MD Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$			
	SZ	AKM	LA	MD
SZ	1,00	0,61	0,94	-0,05
AKM	0,61	1,00	0,33	0,18
LA	0,94	0,33	1,00	-0,01
MD	-0,05	0,18	-0,01	1,00

5.1.4 Korrelationen zwischen MMD 0/5 und Kugelmühle 0/2

5.1.4.1 Auswertung des Kugelmühlen-Verfahrens nach TP Min-StB

Die Werte der ersten Zeile (*AKM TP Min-StB*) der in Tabelle 5-5 dargestellten Matrix zeigen, dass zwischen dem Kugelmühlenverfahren nach TP Min-StB und dem MMD-Verfahren ein stärkerer Zusammenhang als zwischen dem Kugelmühlen-Verfahren und den SZ-, LA- und MD-Verfahren besteht.

Tabelle 5-5: Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/2 (TP Min-StB)

Variable	Korrelation MMD 0/5 vs Kugelmühle 0/2 Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$											
	MMD A	MMD B	MMD C	MMD D	MMD E	MMD F	MMD G	MMD H	MMD I	MMD J	MMD K	MMD L
AKM (TP Min-StB)	0,60	0,74	0,80	0,71	0,68	0,65	0,59	0,78	0,78	0,81	0,73	0,76

In Abhängigkeit von der gewählten Methode der Auswertung liegen die Korrelationskoeffizienten zwischen 0,59 und 0,81. Dabei werden höhere Zusammenhänge sowohl bei der Auswertung mit einem Prüfsieb (Methode C) als auch bei der Auswertung in Anlehnung an das Kugelmühlenverfahren (Methoden „H“, „I“, und „J“) festgestellt.

In den Abbildungen 5-1 bis 5-3 sind die Ergebnisse des nach TP Min-StB ausgewerteten Kugelmühlen-Verfahrens und dem MMD-Verfahren nach den Methoden „A“, „J“ und „H“ gegeneinander aufgetragen. Dabei stellt die durchgezogene (rote) Linie die Regressionsgerade dar. Die gestrichelten (roten) Linien markieren das 95 %-Konfidenzintervall; die Variablen r und p stehen für den Korrelationskoeffizienten r sowie den bei dem Unabhängigkeitstest ermittelten p -Wert. Ein p -Wert $< 0,05$ deutet bei einem Signifikanzniveau von 5 % auf eine Abhängigkeit der betrachteten zwei Größen hin.

Wie die Abbildung 5-1 grafisch zeigt, führt die Auswertung des sehr feinen 0,063-mm-Prüfsiebes (Methode „A“) zu einer vergleichsweise schwachen Abhängigkeit zwischen dem MMD- und dem Kugelmühlen-Verfahren.

Insbesondere das Verhalten der Grauwacken 5 und 7, aber auch der Quarzite und Gneise sowie des RC-Betons 23, kann nur bedingt durch einen linearen Zusammenhang zwischen der Methode „A“ und der klassischen Auswertung beschrieben werden.

Ausgehend von der Position der Punkte im Bezug auf die Regressionsgerade kann geschlossen werden, dass das MMD-Verfahren die Grauwacken 5 und 7 im Unterschied zum Kugelmühlen-Verfahren als weniger abriebbeständig einstuft, was auch in geringerem Maße für die Kalkstein 1 und 4 gilt. Dagegen fällt die Abriebbeständigkeit der Quarzite, Gneise sowie des RC-Betons 23 und tendenziell der Granite beim MMD-Verfahren höher aus.

In Abbildung 5-2 sind die Werte des Kugelmühlen-Verfahrens gegenüber dem MMD-Verfahren nach Methode „H“ aufgetragen. Die Auswertung nach Methode „H“ berücksichtigt parallel zum Kugelmühlen-Verfahren die Durchgänge aller verwendeten Prüfsiebe. Im Vergleich zu Methode „A“ mit einem Prüfsieb ergibt sich eine stärkere Korrelation mit $r = 0,78$. Die Annahme, dass eine höhere Übereinstimmung der Art

der Auswertung zu einer stärkeren Korrelation führt, wird in diesem Fall bestätigt.

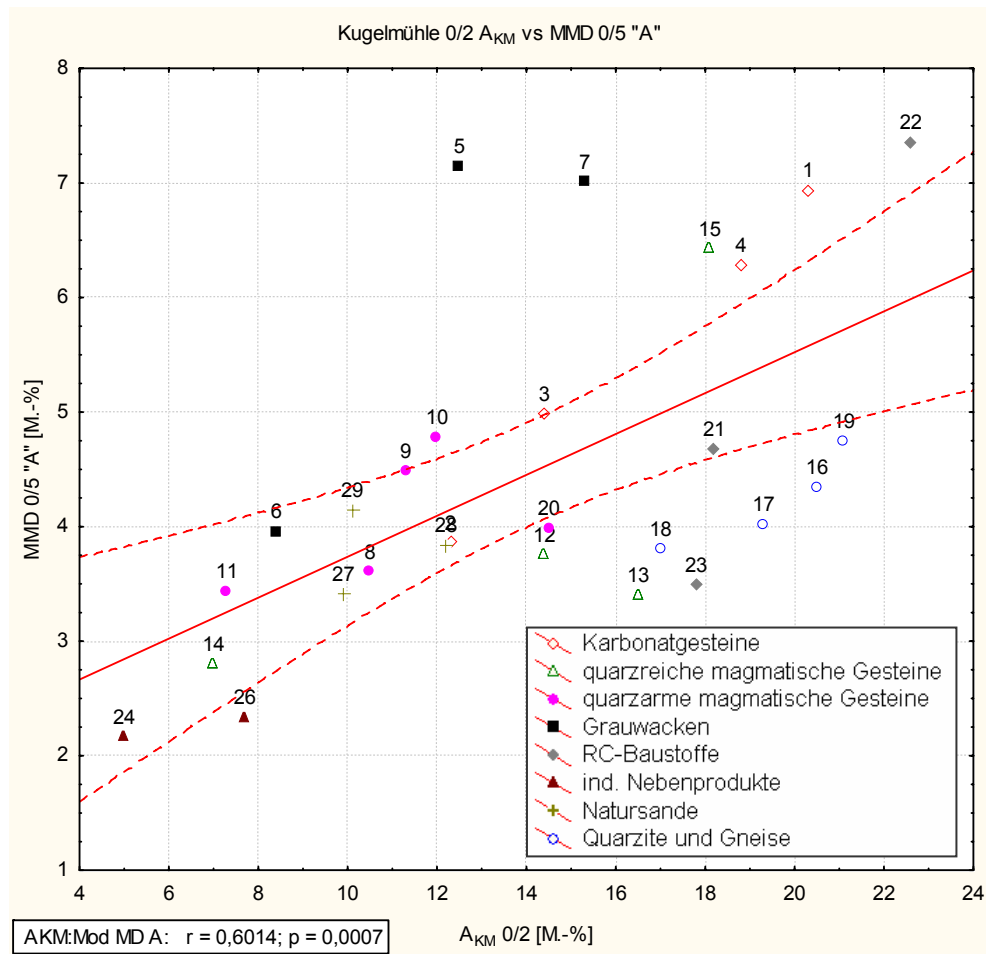


Abbildung 5-1: Kugelmühle 0/2 vs. MMD 0/5 „A“

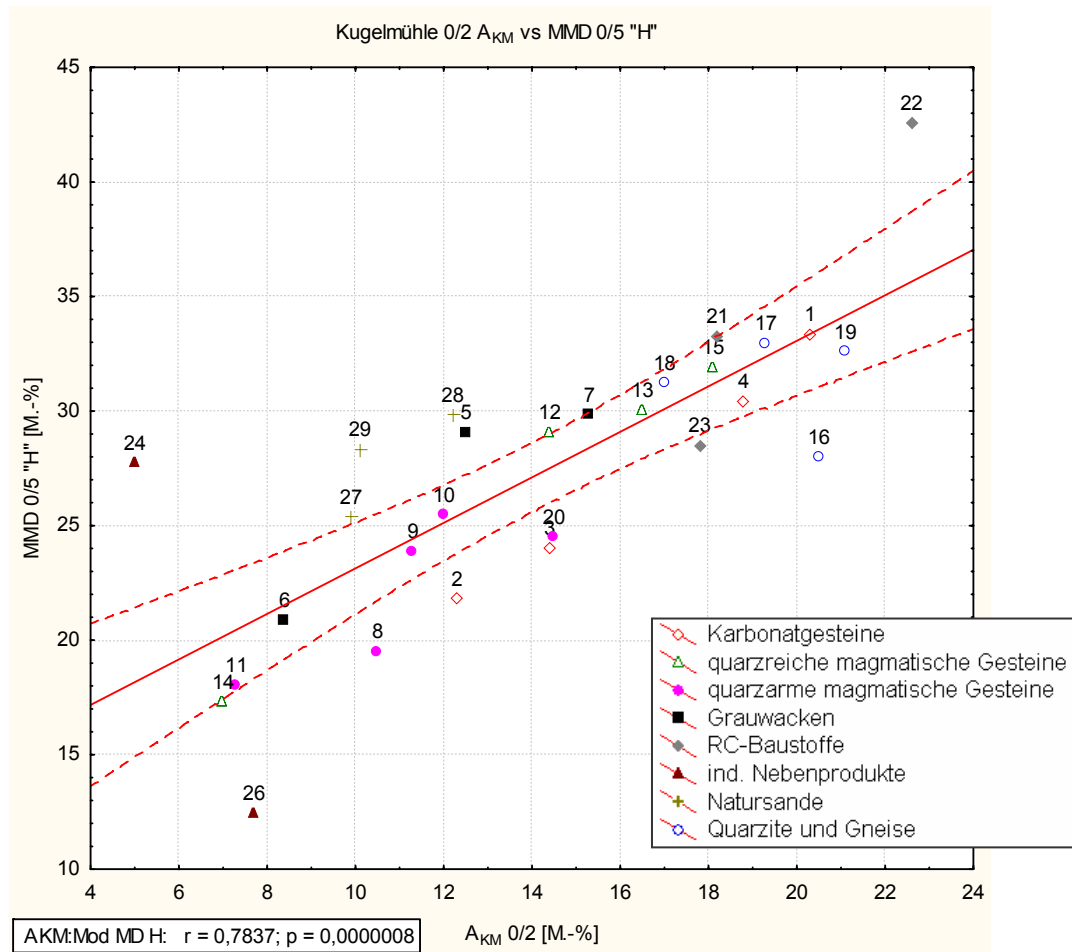


Abbildung 5-2: Kugelmühle 0/2 vs. MMD 0/5 „H“

Erwartungsgemäß ergibt die in Abbildung 5-3 dargestellte Auswertung des MMD-Verfahrens nach Methode „J“ mit den Prüfsieben 0,125 mm, 0,25 mm und 0,71 mm aufgrund der geringen Abweichungen zu den beim Kugelmühlen-Verfahren verwendeten Sieben einen hohen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,81$.

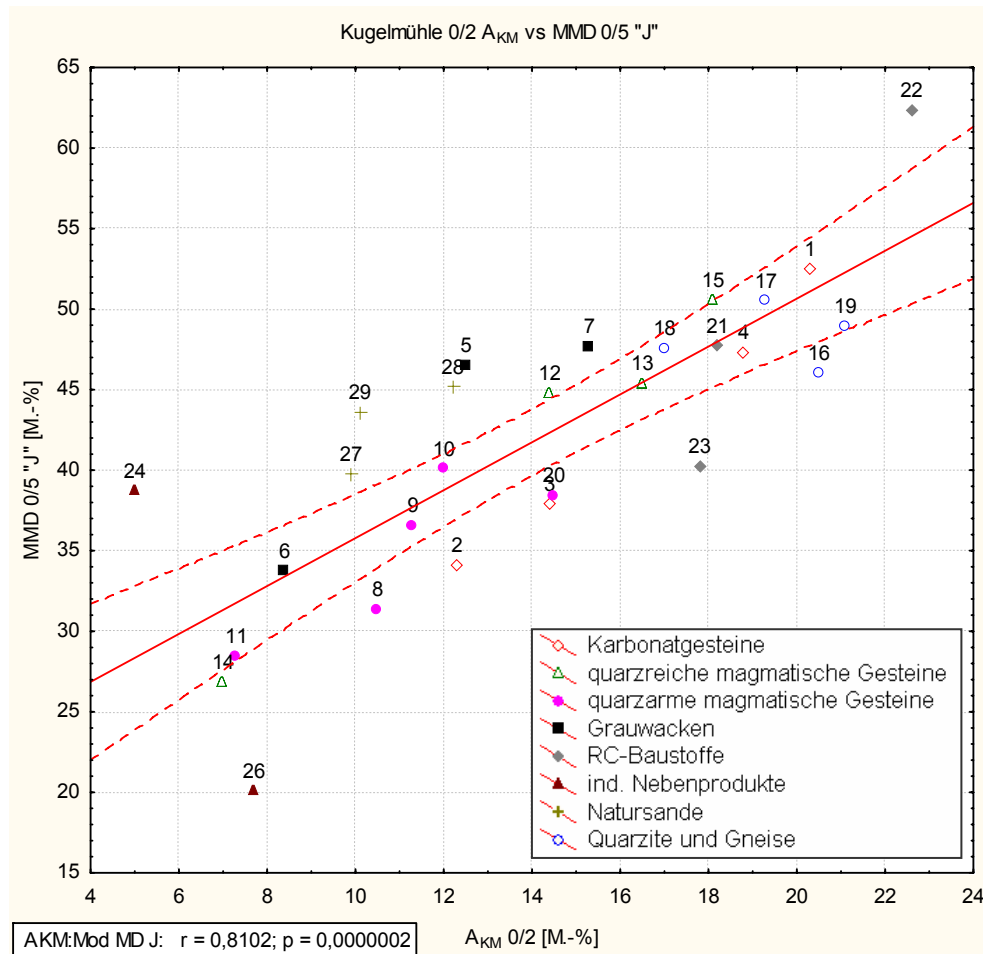


Abbildung 5-3: Kugelmühle 0/2 vs. MMD 0/5 „J“

Die zuvor beobachteten Abweichungen bei den Grauwacken 5 und 7 treten in geringerem Maß auf. Abweichend verhalten sich die industriellen Nebenprodukte 24 und 26 sowie der RC Ziegel 22 und der RC Beton 23. Zudem wird deutlich, dass sich die Natursande 27 bis 29 im Vergleich zu der Auswertung mit einem Prüfsieb (Methoden „A“ und „B“) außerhalb des 95 % - Konfidenzintervalls befinden.

5.1.4.2 Variation der Auswertung der Kugelmühle

Entsprechend der Diskussion verschiedener Methoden der Auswertung des MMD-Verfahrens scheint es sinnvoll, die Auswertung des Kugelmühlen-Verfahrens nach TP Min-StB anzupassen. Dadurch besteht die Möglichkeit, Differenzen der Ergebnisse beider Verfahren durch Unterschiede in der Auswertung zu erklären.

Neben der klassischen Auswertung (A_{KM}) wurden die Werte für drei weitere Methoden berechnet, welche auf der Betrachtung des Durchganges eines bestimmten Prüfsiebes beruhen. In Anlehnung an die TP Min-StB wurden die Prüfsiebe 0,09 mm (A_{KM} „A“), 0,25 mm (A_{KM} „B“) und 0,71 mm (A_{KM} „C“) verwendet.

Tabelle 5-6: Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/2 (Modifiziert)

Variable	Korrelation MMD 0/5 vs Kugelmühle 0/2 Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$											
	MMD A	MMD B	MMD C	MMD D	MMD E	MMD F	MMD G	MMD H	MMD I	MMD J	MMD K	MMD L
AKM (TP Min-StB)	0,60	0,74	0,80	0,71	0,68	0,65	0,59	0,78	0,78	0,81	0,73	0,76
AKM A (Modifiziert)	0,77	0,82	0,63	0,42	0,38	0,34	0,29	0,59	0,79	0,67	0,46	0,53
AKM B (Modifiziert)	0,58	0,72	0,75	0,66	0,62	0,59	0,54	0,73	0,75	0,77	0,68	0,71
AKM C (Modifiziert)	0,41	0,57	0,78	0,80	0,79	0,78	0,73	0,80	0,66	0,78	0,81	0,81

Die in der 2. bis 4. Zeile der Korrelationsmatrix in Tabelle 5-6 aufgeführten Werte zeigen tendenziell, dass die auf ein bestimmtes Prüfsieb bezogene Auswertung bei der Verfahren zu größeren Übereinstimmungen führen kann, wie die Korrelationskoeffizienten zwischen dem MMD-Verfahren nach Methode A und B einerseits und den nach den Methoden A_{KM} „A“ bis „C“ im Vergleich zur klassischen Auswertung andererseits zeigen. Dementsprechend sind die Übereinstimmungen zwischen den Abriebwerten A_{KM} der Kugelmühle mit den Ergebnissen des MMD-Verfahrens bei Berücksichtigung mehrerer Siebe stärker ausgeprägt.

In Abbildung 5-4 sind die mit dem 0,09-mm-Prüfsieb ermittelten Abriebwerte des Kugelmühlen-Verfahrens den Werten des MMD-Verfahrens nach Methode „B“ (0,125 mm) gegenübergestellt. Die geringen Abweichungen der verwendeten Sieböffnungsweiten führen in diesem Fall zu einer vergleichsweise guten Korrelation.

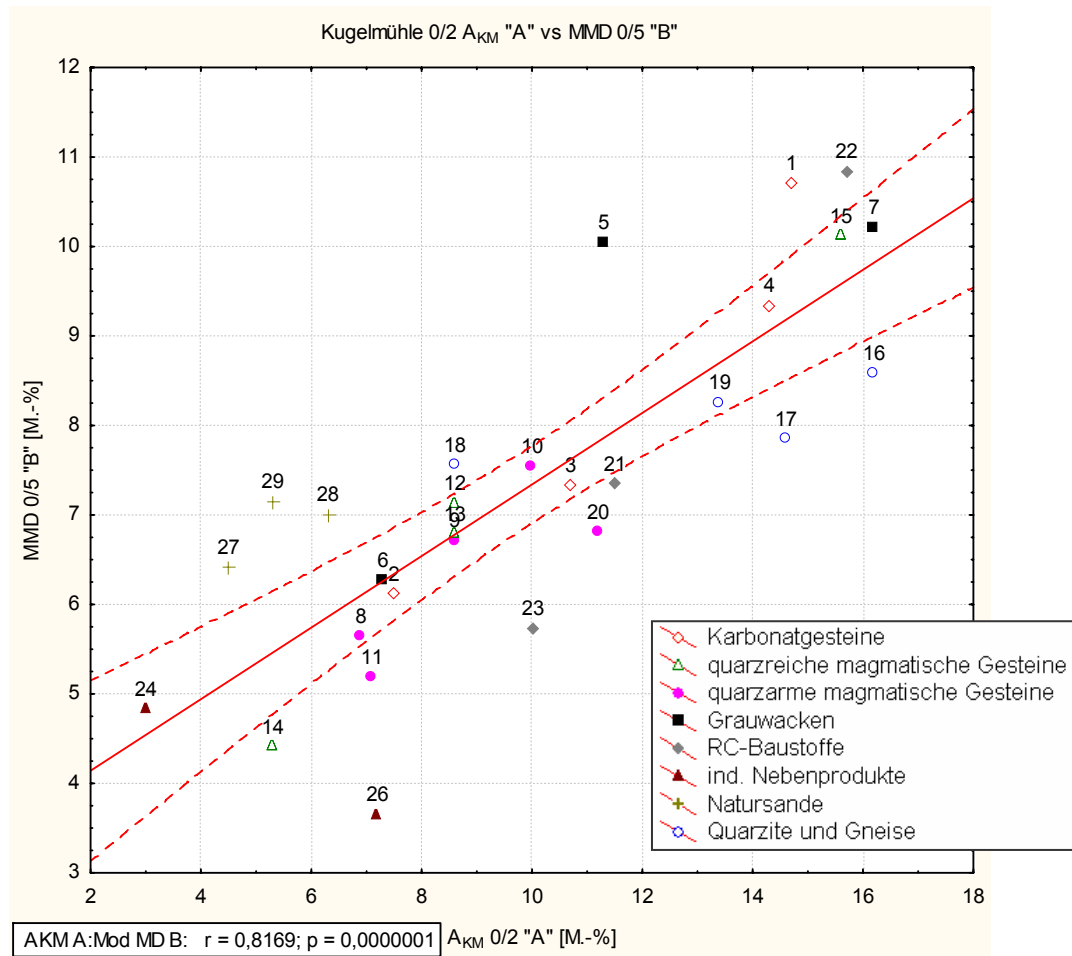


Abbildung 5-4: Kugelmühle „A“ (0,09 mm) vs. MMD „B“ (0,125 mm)

Die Abbildung 5-5 macht deutlich, dass auch bei exakt übereinstimmenden Prüfsieben keine statistisch zufriedenstellende Korrelation von $r > 0,9$ zu erreichen ist. Einige Gesteinsarten wie beispielsweise LD-Schlacke 26, RC-Ziegel 22 oder SKG 24 liegen häufig außerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls und verschlechtern den Korrelationskoeffizienten signifikant.

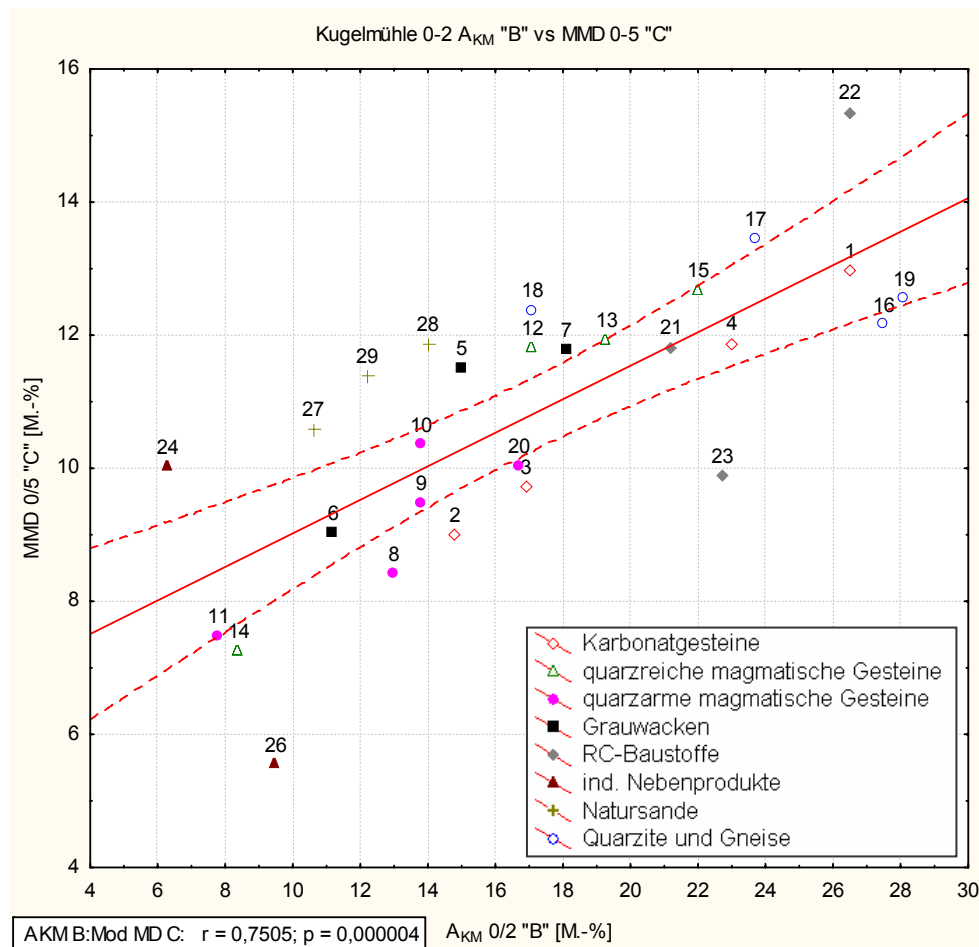


Abbildung 5-5: AKM 0/2 „B“ (0,25 mm) vs. MMD 0/5 „C“ (0,25 mm)

Die in Abbildung 5-6 dargestellte Auswertung beider Verfahren mittels Betrachtung des Durchganges des Prüfsiebes 0,71 mm führt ebenfalls nur zu einer mäßigen Korrelation mit $r = 0,79$. Insbesondere die Werte des Schmelzkammergranulates 24 und der LD-Schlacke 26 lassen sich wiederum nicht durch eine lineare Funktion beschreiben. Auch bei den Kalksteinen 2 und 3 sowie den Natursanden sind in Abhängigkeit vom jeweiligen Verfahren unterschiedliche Einstufungen hinsichtlich des Abriebwiderstandes zu erwarten.

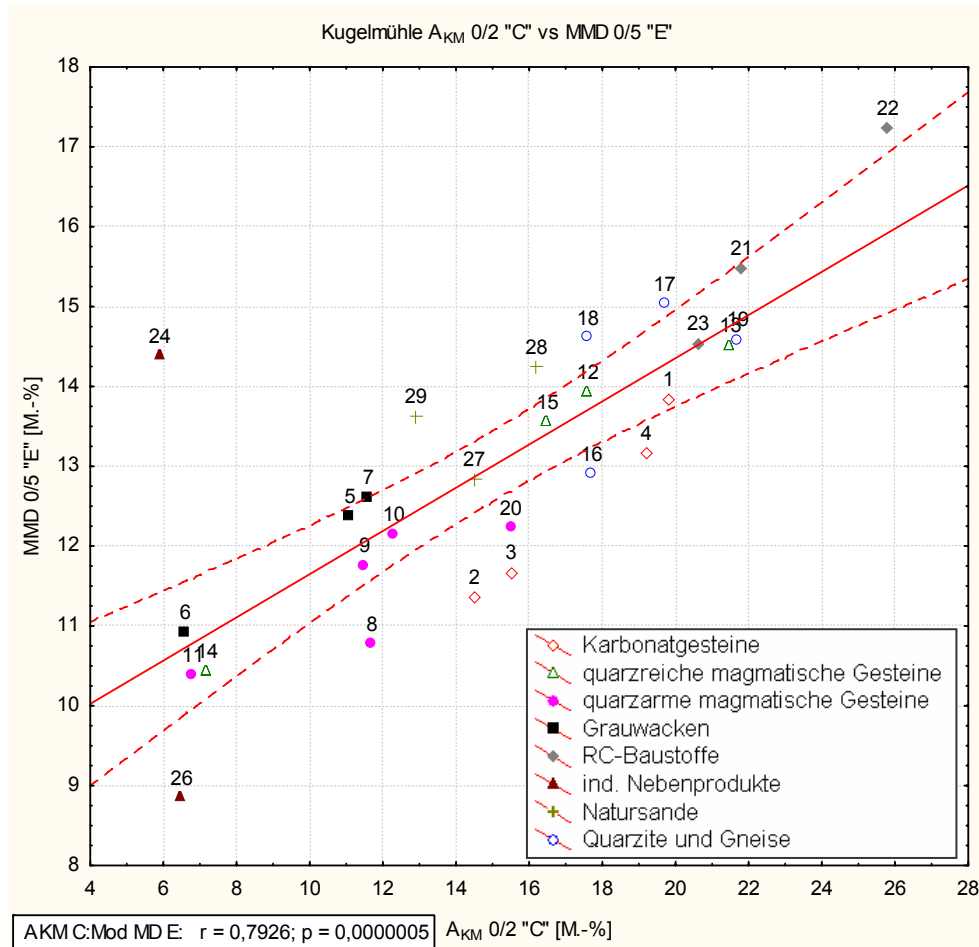


Abbildung 5-6: A_{KM} 0/2 „C“ (0,71 mm) vs. MMD 0/5 „E“ (0,71 mm)

5.1.5 Korrelation zwischen MMD 0/2 (500 U) und Kugelmühle 0/2

Beispielhaft am Kalkstein 3 sind in Abbildung 5-7 die Korngrößenverteilungen (KGV) vor und nach Beanspruchung dargestellt. Nachdem die bisherige Auswertung noch keine zufriedenstellende Korrelation ergab, wurden die Ergebnisse des MMD 0/2-Verfahrens (500 U) mit den Ergebnissen des Kugelmühlen-Verfahrens 0/2 verglichen.

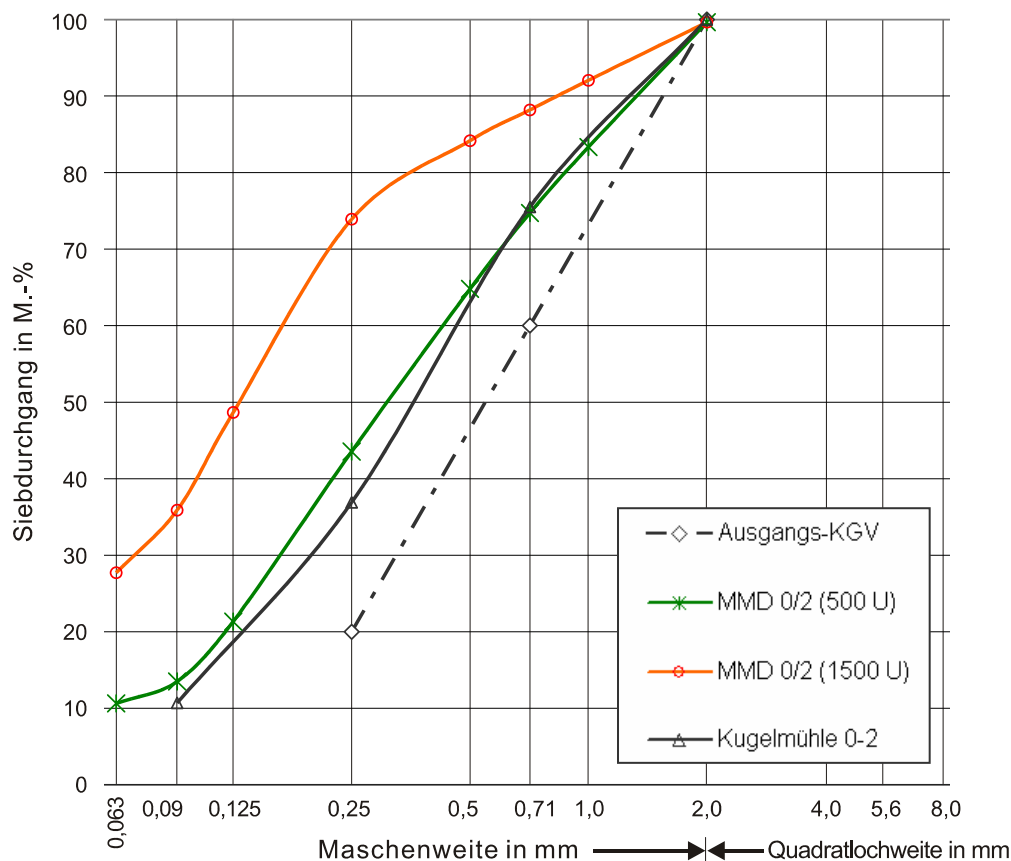


Abbildung 5-7: KGV vor und nach Beanspruchung für MMD 0/2 nach 500 U und nach 1500 U, Kugelmühle 0/2 nach Beanspruchung für Kalkstein 3

Die hier erkennbaren geringen Abweichungen der Korngrößenverteilungen des Kugelmühlen-Verfahrens 0/2 und des MMD-Verfahrens 0/2 nach 500 Umdrehungen wurden auch bei den weiteren untersuchten Materialien festgestellt und lassen auf eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse schließen. Lediglich die Untersuchung der Grauwacke 7 ergab geringfügig stärkere Abweichungen zwischen den beiden Verfahren.

Die tendenziellen Übereinstimmungen zwischen dem MMD 0/2-Verfahren bei 500 Umdrehungen und dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2 spiegeln sich in den in den Abbildungen 5-8 und 5-9 dargestellten Reihungen wider. Dazu wurden die Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Abriebwert $A_{KM(MMD)}$ bzw. MMD-Wert geordnet. Abgesehen von den vertauschten Positionen des RC Ziegels und des Kalksteins 1 führen beide Verfahren zu einer identischen Reihung der Materialien.

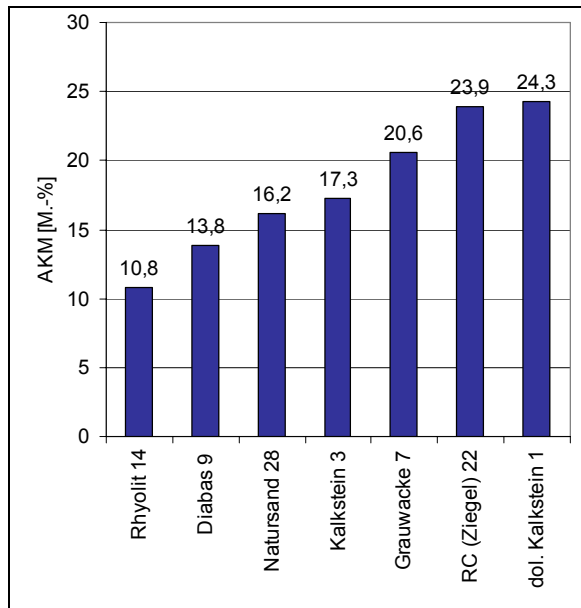


Abbildung 5-8: MMD 0/2 $A_{KM(MMD)}$ (500 U)

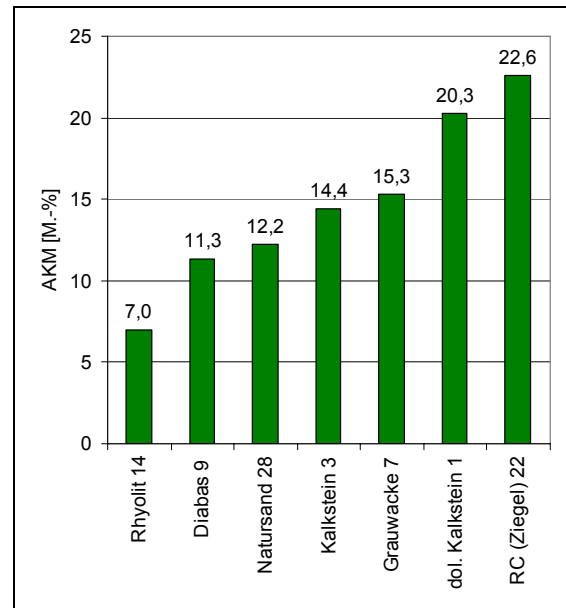


Abbildung 5-9: Kugelmühle 0/2 A_{KM}

Die gute Korrelation zwischen den beiden Verfahren kann auch mit Hilfe der in Tabelle 5-7 dargestellten Matrix nachgewiesen werden. Hierbei sei jedoch auf den geringeren Datenumfang hingewiesen, der nur eine begrenzte Aussage zulässt und durch weitere Untersuchungen abgesichert werden sollte.

Die Bezeichnung MMD 0/2 „AB“ steht für die Auswertung mit Hilfe des 0,09-mm-Prüfsiebes, welches auf die Verwendung beim Kugelmühlen-Verfahren zurückzuführen ist. Die weiteren Bezeichnungen A bis F entsprechen der in Tabelle 4-4 erläuterten Methoden zur Auswertung der Korngrößenverteilung nach Beanspruchung.

Tabelle 5-7: Korrelationsmatrix MMD 0/2 (500 U) vs. Kugelmühle 0/2 A_{KM} , A bis C

Variable	Korrelationen MMD 0/2 vs Kugelmühle 0/2 A_{KM} , A bis C Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$			
	AKM	AKM A	AKM B	AKM C
MMD 0/2 A	0,81	0,98	0,83	0,51
MMD 0/2 AB	0,77	0,97	0,79	0,45
MMD 0/2 B	0,76	0,93	0,80	0,44
MMD 0/2 C	0,91	0,89	0,94	0,70
MMD 0/2 D	0,91	0,64	0,88	0,95
MMD 0/2 E	0,80	0,46	0,75	0,94
MMD 0/2 F	0,58	0,16	0,52	0,83
MMD 0/2 G	-0,66	-0,92	-0,63	-0,36
MMD 0/2 L	0,91	0,88	0,94	0,71
MMD 0/2 $A_{KM(MMD)}$	0,97	0,90	0,97	0,82

In Abhängigkeit vom Auswerteverfahren lassen sich Korrelationskoeffizienten von $r > 0,90$ realisieren. Gute Übereinstimmungen der Ergebnisse ergaben sich beispielsweise bei einer Auswertung nach den TP Min-StB mit Hilfe des Abriebwertes A_{KM} sowie der Betrachtung des Durchganges durch das 0,09-mm-Prüfsieb (MMD „AB“ und Kugelmühle AKM „A“) sowie das 0,71-mm-Prüfsieb (MMD „E“ und Kugelmühle AKM „C“).

Ergänzend wurden in Abbildung 5-10 Wertepaare aus den Ergebnissen beider Verfahren gebildet und aufgetragen. Die Punkte befinden sich überwiegend in geringem Abstand zu der ermittelten Regressionsgerade.

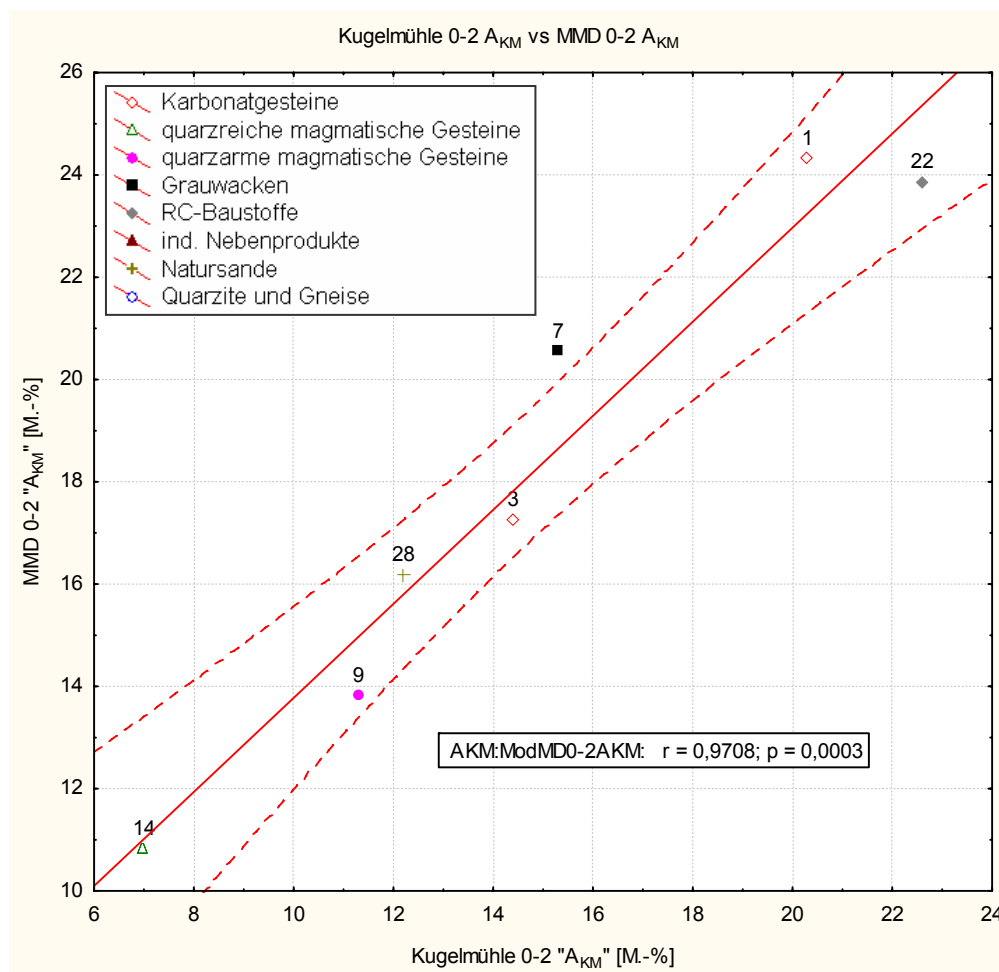


Abbildung 5-10: Kugelmühle 0/2 (A_{KM}) und MMD 0-2 (A_{KM}) (500 U)

5.1.6 Korrelation zwischen Kugelmühle 0/5 und MMD 0/5

In Abbildung 5-11 sind beispielhaft für die sechs untersuchten Materialien die Korngrößenverteilungen vor und nach Beanspruchung mit der Prallprüfung in der Kugelmühle 0/5 (grün) für den Kalkstein 1 dargestellt. Ergänzend ist die Korngrößenverteilung nach Beanspruchung mit dem MMD-Verfahren 0/5 (rosa) aufgeführt.

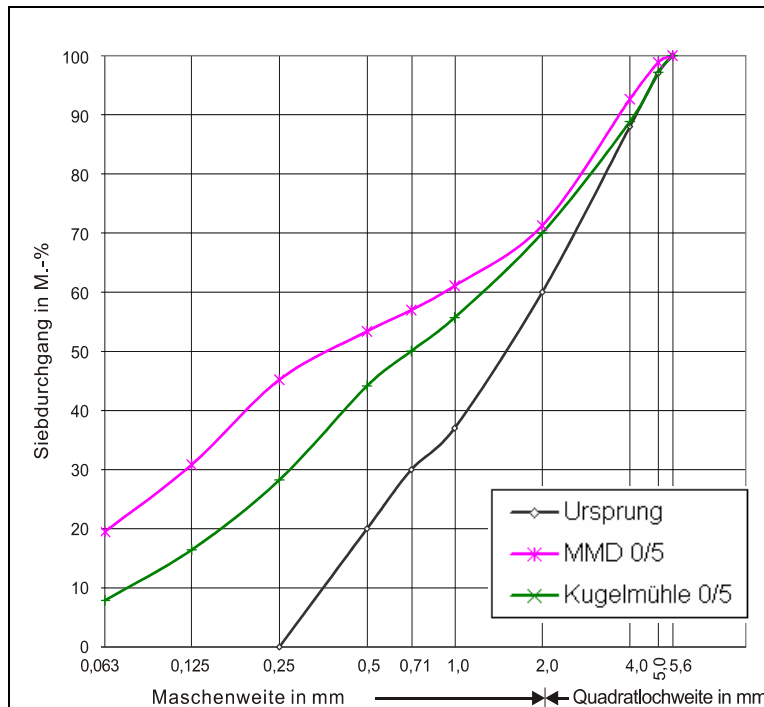


Abbildung 5-11: Vergleich MMD 0/5 und Kugelmühle 0/5 (Kalkstein 1)

Die Betrachtung der beiden Verläufe zeigt, dass die Abriebbeanspruchung in der Kugelmühle zu einer geringeren Verfeinerung der Probe führt als bei dem MMD Verfahren. Die Siebdurchgänge nach Beanspruchung durch das MMD-Verfahren sind durchgängig höher als bei der Prüfung in der Kugelmühle. Da die Prüfung im Vergleich zum MMD-Verfahren in der Kugelmühle ohne Zugabe von Wasser und mit insgesamt nur 1000 Umdrehungen erfolgte, entspricht die geringere Beanspruchung den Erwartungen.

Generell ist festzustellen, dass qualitativ ein vergleichbarer Verlauf der Korngrößenverteilungen vorliegt.

Die Abbildungen 5-12 und 5-13 zeigen die Reihung der Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der mit den beiden Verfahren ermittelten Festigkeit bei Auswertung nach Methode „A“ (0,063-mm-Prüfsieb).

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass bei Ausschluss der Grauwacke 7 eine übereinstimmende Reihung vorliegt. Dies deutet auf einen Zusammenhang der Ergebnisse beider Verfahren hin.

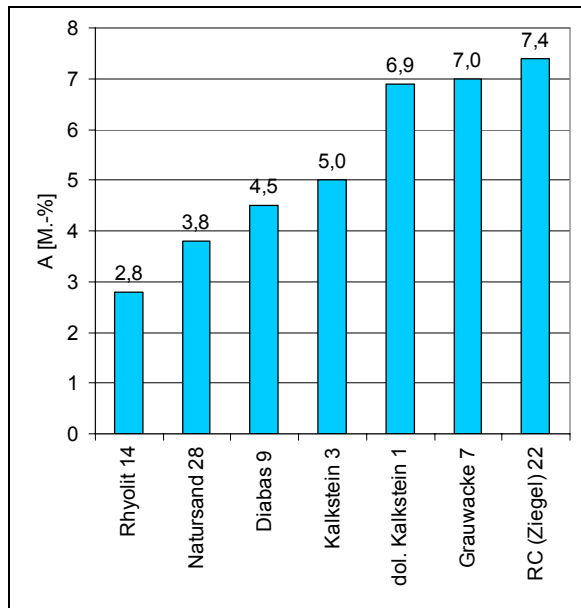


Abb. 5-12: MMD 0/5 „A“ (0,063 mm)

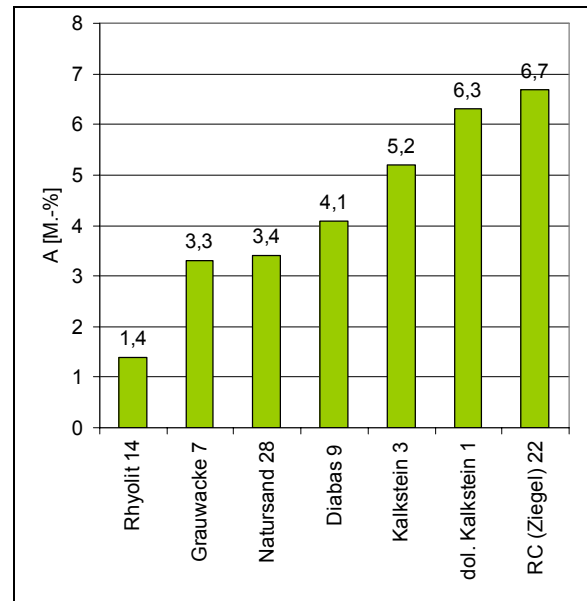


Abb. 5-13: Kugelmühle 0/5 „A“ (0,063 mm)

In Tabelle 5-8 ist die Korrelationsmatrix der Ergebnisse des MMD 0/5-Verfahrens und des Kugelmühlen-Verfahrens 0/5 dargestellt.

Die mit Unsicherheiten behafteten Berechnungen der Koeffizienten können nur zur ersten Abschätzung von Tendenzen herangezogen werden. So zeigt sich, dass im Vergleich zur Prüfung der Körnung 0/2 mm mit den gleichen Verfahren bei der Körnung 0/5 mm leicht schwächere Korrelationen bestehen. Bei einer Auswertung unter Berücksichtigung der Siebe mit Öffnungsweiten bis 0,25 mm (Methoden A bis C) wurden Koeffizienten zwischen $r = 0,7$ bis $0,8$ erreicht, während bei den Sieben mit größeren Öffnungsweiten höhere Koeffizienten bis zu $r = 0,95$ festgestellt wurden.

Tabelle 5-8: Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/5

Variable	Korrelationen MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/5 Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$											
	AKM 0-5 A	AKM 0-5 B	AKM 0-5 C	AKM 0-5 D	AKM 0-5 E	AKM 0-5 F	AKM 0-5 G	AKM 0-5 H	AKM 0-5 I	AKM 0-5 J	AKM 0-5 K	AKM 0-5 L
MMD A	0,75	0,69	0,64	0,59	0,56	0,56	0,62	0,64	0,68	0,64	0,60	0,67
MMD B	0,77	0,73	0,70	0,67	0,64	0,63	0,64	0,70	0,72	0,70	0,67	0,72
MMD C	0,77	0,78	0,77	0,87	0,87	0,87	0,84	0,86	0,79	0,83	0,86	0,85
MMD D	0,71	0,76	0,75	0,90	0,92	0,92	0,90	0,89	0,76	0,83	0,89	0,87
MMD E	0,70	0,75	0,75	0,90	0,93	0,93	0,91	0,89	0,75	0,83	0,89	0,87
MMD F	0,69	0,74	0,75	0,91	0,93	0,94	0,92	0,89	0,75	0,83	0,89	0,87
MMD G	0,67	0,72	0,72	0,89	0,92	0,94	0,95	0,89	0,72	0,81	0,88	0,87
MMD H	0,78	0,79	0,78	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,79	0,84	0,87	0,88
MMD I	0,79	0,77	0,74	0,75	0,73	0,73	0,74	0,77	0,76	0,76	0,75	0,79
MMD J	0,79	0,79	0,78	0,85	0,85	0,85	0,84	0,86	0,79	0,83	0,85	0,85
MMD K	0,73	0,77	0,76	0,90	0,92	0,92	0,90	0,89	0,77	0,84	0,89	0,87
MMD L	0,75	0,78	0,77	0,90	0,91	0,91	0,90	0,89	0,78	0,84	0,89	0,88

Entsprechend der schwächeren Zusammenhänge der Ergebnisse lässt sich die in Abbildung 5-14 aufgetragene Punktemenge nur unzureichend durch einen linearen Zusammenhang beschreiben. Auffällig ist der deutliche Abstand der Grauwacke 7 von der ermittelten Regressionsgeraden.

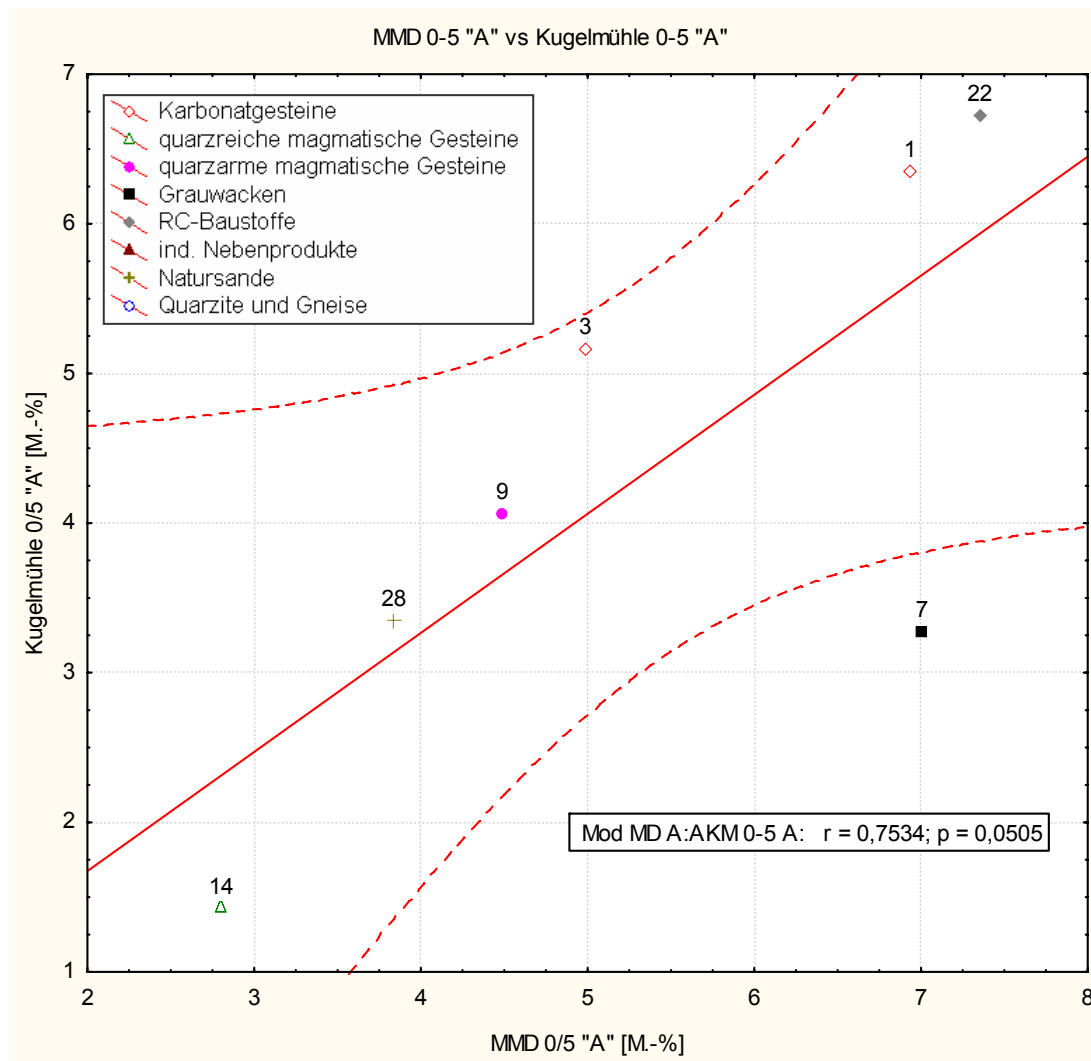


Abbildung 5-14: MMD 0/5 „A“ vs. Kugelmühle 0/5 „A“

5.1.7 Einfluss der Rohdichte und des Fließkoeffizienten

- Rohdichte

Die für die Prüfung verwendeten Gemische aus Gesteinskörnungen werden nach gravimetrischen Vorgaben zusammengesetzt. Die unterschiedlichen Dichten der Gesteinskörnungen haben zur Folge, dass bei gravimetrischer Mengenvorgabe das Probenvolumen variiert. Denkbar ist, dass ein Gestein mit sehr hoher Dichte und entsprechend geringem Volumen stärker als ein Gestein mit niedriger Dichte in der

jeweiligen Prüfapparatur beansprucht wird. So nimmt z. B. das Verhältnis von Reibladung zur Volumeneinheit der Körnung bei einer hohen Dichte zu, zudem könnte sich der Puffereffekt bei einem geringen Volumen vermindern.

Die Betrachtung der Korrelationskoeffizienten zwischen den Rohdichten und den Ergebnissen der Prüfverfahren deutet auf einen eher geringen Einfluss der Rohdichte der Prüfkörnung. Die Korrelationskoeffizienten liegen mehrheitlich in einem Bereich von $r < 0,5$. Zwischen den Ergebnissen des MMD-Verfahrens „D“, „E“ und „K“ und der Rohdichte 2/5 mm der Gesteinskörnungen wurden die insgesamt höchsten Koeffizienten mit Werten von etwa 0,7 ermittelt. Die Werte des MMD-Verfahrens 0/5 „D“ sind den Rohdichten 2/5 mm in Abbildung 5-15 gegenübergestellt.

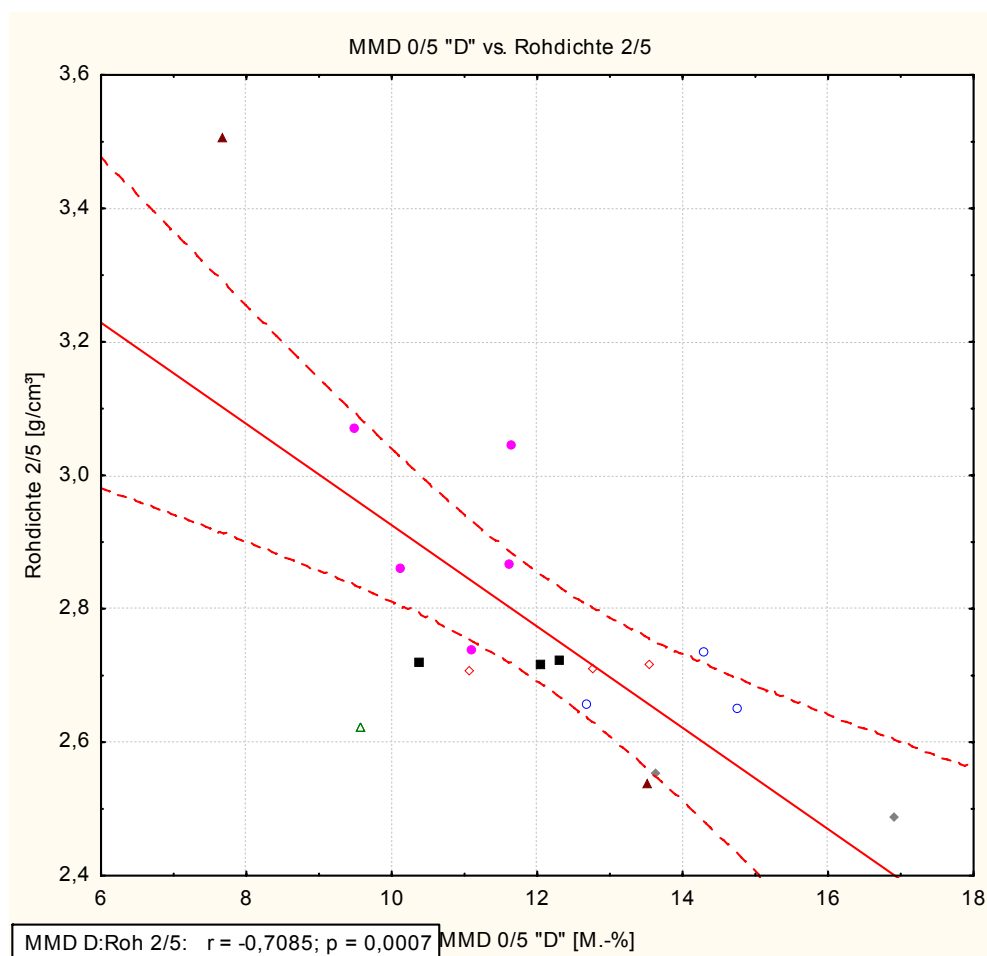


Abbildung 5-15: MMD 0/5 „D“ vs. Rohdichte 2/5 mm

- Fließkoeffizient

Brechsande weisen in der Regel eine höhere Ausflusszeit als Natursande auf. Die oben beschriebene tendenzielle Zunahme der Werte entspricht nicht den Erwartungen, da durch die reibende Beanspruchung in der Kugelmühle von einer

Abrundung der Körner auszugehen ist.

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen dem an den Körnungen 0/2 mm ermittelten modifizierten Fließkoeffizienten vor oder nach Beanspruchung durch das Kugelmühlen-Verfahren und den Ergebnissen der weiteren Verfahren lassen erkennen, dass die Kantigkeit einen Einfluss auf bestimmte Prüfverfahren haben kann. So wurde beispielsweise der in Tabelle 5-9 dargestellte Koeffizient von $r = 0,76$ zwischen dem Kugelmühlen-Verfahren und dem Fließkoeffizienten nach Beanspruchung ermittelt. Wider Erwarten wurden bei den Fließkoeffizienten nach Beanspruchung stärkere Zusammenhänge zu den weiteren Verfahren ermittelt als bei den Fließkoeffizienten der ursprünglichen Gesteinskörnungen.

Tabelle 5-9: Korrelationsmatrix mod. Fließkoeffizient vs. ausgewählte Verfahren

Variable	mod. Fließkoeffizient (vor und nach Beanspruchung) vs. ausgewählte Verfahren Markierte Korr. signifikant für $p < ,05000$					
	SZ	AKM	LA	MD	MMD A	MMD H
mod. Fließkoeffizient 0/2 (vor Beanspruchung)	-0,08	0,52	-0,24	0,29	0,50	0,46
mod. Fließkoeffizient 0/2 (nach Beanspruchung)	0,41	0,76	0,28	0,43	0,59	0,68

5.2 Schlussfolgerungen aus den ermittelten Korrelationen

Die Ergebnisse eines Verfahrens können neben weiteren Faktoren durch die Korn-durchmesser der Prüfprobe, die Art der Beanspruchung (z. B. schlagend oder mah-lend) sowie die Art der Auswertung beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Untersu-chungen haben gezeigt, dass erwartungsgemäß nicht ein Faktor für sich ausschlag-gend für eine starke oder schwache Korrelation ist. Erst mit zunehmender Über-einstimmung der Prüfbedingungen weisen die Ergebnisse der jeweiligen Verfahren größere Übereinstimmungen auf.

Stimmen die Art der Beanspruchung und die Prüfkörnungen weitgehend überein, sind die Korrelationen meist stark ausgeprägt, wie der in Kapitel 5.2.3 dargestellte Zusammenhang zwischen dem SZ- und dem LA-Verfahren ($r = 0,94$) zeigt. Dagegen wurde trotz vergleichbarer Art der Beanspruchung nur ein schwacher Zusammen-hang zwischen den Ergebnissen des MD-Verfahrens und des MMD-Verfahrens ($r = 0,53$) sowie dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2 ($r = 0,18$) festgestellt. Umgekehrt konnte bei übereinstimmender Prüfkörnung 10/14 mm aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung kein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des LA- und des MD-Verfahrens ($r = -0,01$) nachgewiesen werden. Dies entspricht

den in Kapitel 2.2.7 erläuterten Ergebnissen früherer Untersuchungen.

Eine differenziertere Aussage erlaubt die in den Kapiteln 4.2 und 4.3 beschriebene Durchführungen des Kugelmühlen-Verfahrens und des MMD-Verfahrens mit jeweils gleicher Zusammensetzung der Proben. In Abhängigkeit von der Auswertung wurden weitgehend übereinstimmende Reihungen der sieben Gesteinskörnungen nach ihrer Abriebfestigkeit und ähnliche Verläufe der Korngrößenverteilungen nach Beanspruchung festgestellt. Daraus kann gefolgert werden, dass die von beiden Verfahren ausgeübte Abriebbeanspruchung auf eine Probe 0,25/5,6 mm zu einer vermutlich weitgehend ähnlichen Beurteilung der Abriebfestigkeit führt. Unterschiede der Verfahren zeigen sich bei der Grauwacke 7, die beim Kugelmühlen-Verfahren als wesentlich abriebbeständiger eingestuft wird. Zudem ist die höhere Abriebleistung des MMD-Verfahrens, welche sich in der im Vergleich zum Kugelmühlen-Verfahren stärkeren Verfeinerung der Probe äußert, zu berücksichtigen.

In einem weiteren Schritt wurden die Proben entsprechend des Kugelmühlen-Verfahrens zusammengesetzt und bei den sieben ausgewählten Gesteinskörnungen mit beiden Verfahren belastet. Die Prüfung mit gleicher Zusammensetzung der Proben 0,09/2,0 mm bewirkte eine nahezu identische Reihung der Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von ihrem nach den TP Min-StB berechneten Abriebwert A_{KM} . Weiterhin wurden weitgehend übereinstimmende Verläufe der Korngrößenverteilungen nach Beanspruchung der Proben festgestellt. Diese Erkenntnisse lassen auf eine vermutlich ähnliche Beanspruchung von feinen Proben 0,09/2,0 mm schließen.

Im Hinblick auf den Vergleich des MMD-Verfahrens 0/5 mit dem Kugelmühlenverfahren 0/2 konnten abweichende Beurteilungen der Festigkeiten zum Teil auf die verschiedenen Arten der Auswertung zurückgeführt werden.

Die starke Korrelation zwischen dem MMD-Verfahren 0/5 und dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2 entspricht den Erwartungen, da die Art der Beanspruchung übereinstimmt und die Unterschiede in den Korndurchmessern der Proben im Vergleich zu anderen Verfahren geringer ausfallen. Ein entsprechend starker Zusammenhang konnte auch zwischen dem Micro-Deval-Verfahren nach CSA für feine Körnungen und dem Dowson-Lilley Kugelmühlen-Verfahren wie in Kapitel 2.2.7 beschrieben ermittelt werden.

Wie der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren zeigt, ergibt sich eine übereinstimmende Beurteilung der Abriebfestigkeit von Gesteinskörnungen nur bei Übereinstimmung der Belastungsart und ähnlichen Prüfkörnungen. Hieraus kann geschlossen werden, dass eine Aussage zu der Abriebbeständigkeit von feinen Gesteinskörnungen vermutlich nicht anhand der alleinigen Untersuchung von groben

Körnungen derselben Herkunft getroffen werden kann.

5.3 Auswertung des MMD-Verfahrens 0/5

5.3.1 Wahl einer geeigneten Methode

In den vorangegangenen Abschnitten wurde erläutert, dass in Abhängigkeit von der Auswertung des MMD-Verfahrens Unterschiede in den Korrelationen zu den Ergebnissen von weiteren Verfahren sowie eine in bestimmten Fällen abweichende Beurteilung der Abriebbeständigkeit von Gesteinskörnungen zu erwarten sind.

Die Auswertung des MMD-Verfahrens mit dem 0,063-mm-Prüfsieb nach Methode „A“ ergibt eine plausible Einstufung der untersuchten Gesteinskörnungen und erlaubt eine zufriedenstellende Unterscheidung von Materialien mit hohem, mittlerem und geringem Abriebwiderstand. Gesteinskörnungen einer Gesteinsart weisen bei räumlich verschiedenen Gewinnungsstätten entsprechend den Ergebnissen anderer Verfahren beim MMD-Verfahren „A“ unterschiedliche Festigkeiten auf, wie es beispielhaft an den Grauwacken und Kalksteinen zu erkennen ist.

Für die Wahl des feinen Prüfsiebes spricht zudem die in Kapitel 2.3.7 erläuterte Bedeutung der Anreicherung von Feinkorn in der Bettungsschicht und Fuge bei der Entwicklung von Schäden. Da das nach Methode „A“ berechnete Ergebnis ein direktes Maß für die Zunahme des Anteils $< 0,063$ mm bei Beanspruchung der Gesteinskörnung darstellt, scheint diese Methode für die Beurteilung von Bettungs- und Fugenmaterial geeignet zu sein.

5.3.2 Erkennung von Ausreißern

Bei einer Messreihe gibt es in den meisten Fällen einzelne Werte, die erheblich von den anderen abweichen. Solche Werte werden als „Ausreißer“ bezeichnet. Die Überprüfung, welche Werte als Ausreißer zu deklarieren sind, kann nach dem Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: „Erkennen und Behandeln von Ausreißern“ [50] erfolgen. Das Merkblatt beinhaltet das Verfahren zur Ausreißererkennung nach Davies/Gather mit dem Hampel-Identifizierer. Anhand des Verfahrens von Davies/Gather werden die Messwerte zunächst nach der Größe sortiert. Aus der sortierten Messreihe wird der Median bestimmt und dieser zur Berechnung der absoluten Differenz jedes Messwertes verwendet. Der Median der absoluten Differenz (kurz: MaD) ergibt sich aus den sortierten Differenzen. Mit Hilfe des kritischen Faktors $g(n, \alpha)$, der dem Merkblatt entnommen wurde, können die linke und die rechte Grenze des Intervalls bestimmt werden, in denen ein Wert nicht als Ausreißer gewertet wird. Es wurde ein Signifikanzniveau α von 5 % gewählt.

Die Überprüfung der nach Methode „A“ je Gesteinsart 6-fach ermittelten MMD-Koeffizienten ergab keine Ausreißer in den Messreihen.

5.4 Ermittlung von Anforderungswerte aus den Laborergebnissen

- Bettungsmaterial 0/5

Der auf die Gesamtmasse der Probe 0,25/5,6 mm umgerechnete Anteil $< 0,063$ mm stellt den MMD-Koeffizienten nach Methode „A“ dar. Denkbar ist die Einführung einer Obergrenze in Abhängigkeit von der vorgesehenen Anwendung des Bettungsmaterials. Für hoch beanspruchte Verkehrsflächen in Anlehnung an [16] könnte die zulässige Obergrenze des MMD-Koeffizienten auf 5 M.-% beschränkt werden.

Wie in Abbildung 5-15 zu erkennen ist, würden bestimmte Gesteinskörnungen mit Koeffizienten, die deutlich über dem Durchschnitt der Gesamtmenge liegen, für die Anwendung bei hohen Verkehrslasten ausgeschlossen werden.

Die Festlegung von Anforderungswerten für das Kugelmühlen-Verfahren 0/5 scheint angesichts der geringen Zahl der untersuchten Gesteinskörnungen als zu unsicher und bedarf weiterer Untersuchungen.

- Fugenmaterial 0/2 mm

Anhand der im Labor ermittelten Werte der 29 Gesteinskörnungen können für Fugenmaterial 0/2 mm entsprechende Anforderungswerte diskutiert werden.

Die in Abbildung 5-16 dargestellte Obergrenze schließt Gesteinskörnungen 0/2 mm mit $A_{KM} > 18$ M.-% von der Verwendung als Fugenmaterial für hoch beanspruchte Pflasterflächen aus.

Die geringe Anzahl der mit dem MMD-Verfahren 0/2 untersuchten Gesteinskörnungen erlaubt nicht die Festlegung von Anforderungswerten.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass nach der o. g. Festlegung von Anforderungswerten für beide Verfahren bestimmte Gesteinskörnungen als Bettungsmaterial geeignet wären, während sie für die Herstellung von Fugenmaterial nicht eingesetzt werden dürften und umgekehrt. Ein Beispiel für diesen Zusammenhang stellen die in den Abbildungen 5-16 und 5-17 aufgeführten Quarzite 16 und 17 dar, die in Abhängigkeit von dem jeweiligen Prüfverfahren als geeignet oder ungeeignet eingestuft werden. Die Prüfung von Bettungs- und Fugenmaterial mit zwei verschiedenen Verfahren wird angesichts dieses Widerspruches nicht als zielführend eingestuft.

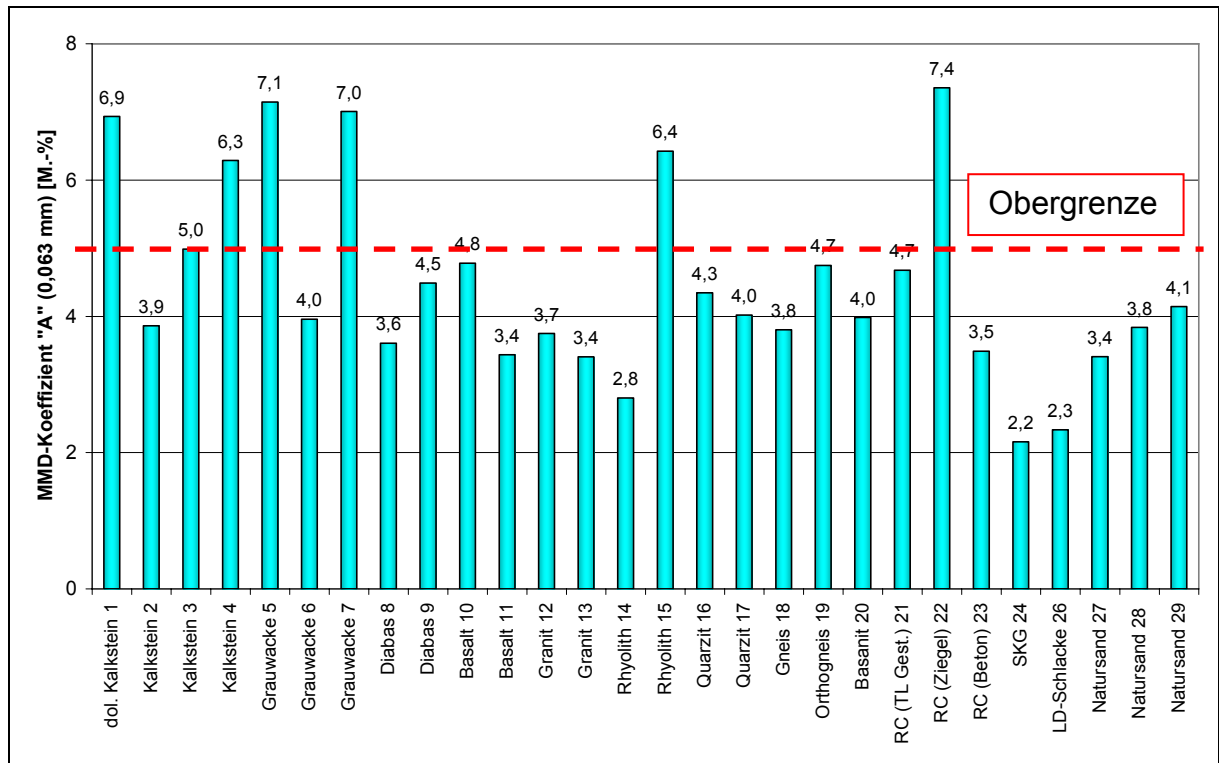


Abbildung 5-16: Obergrenze für den MMD-Koeffizienten bei besonders hohen Verkehrslasten (Bettungsmaterial)

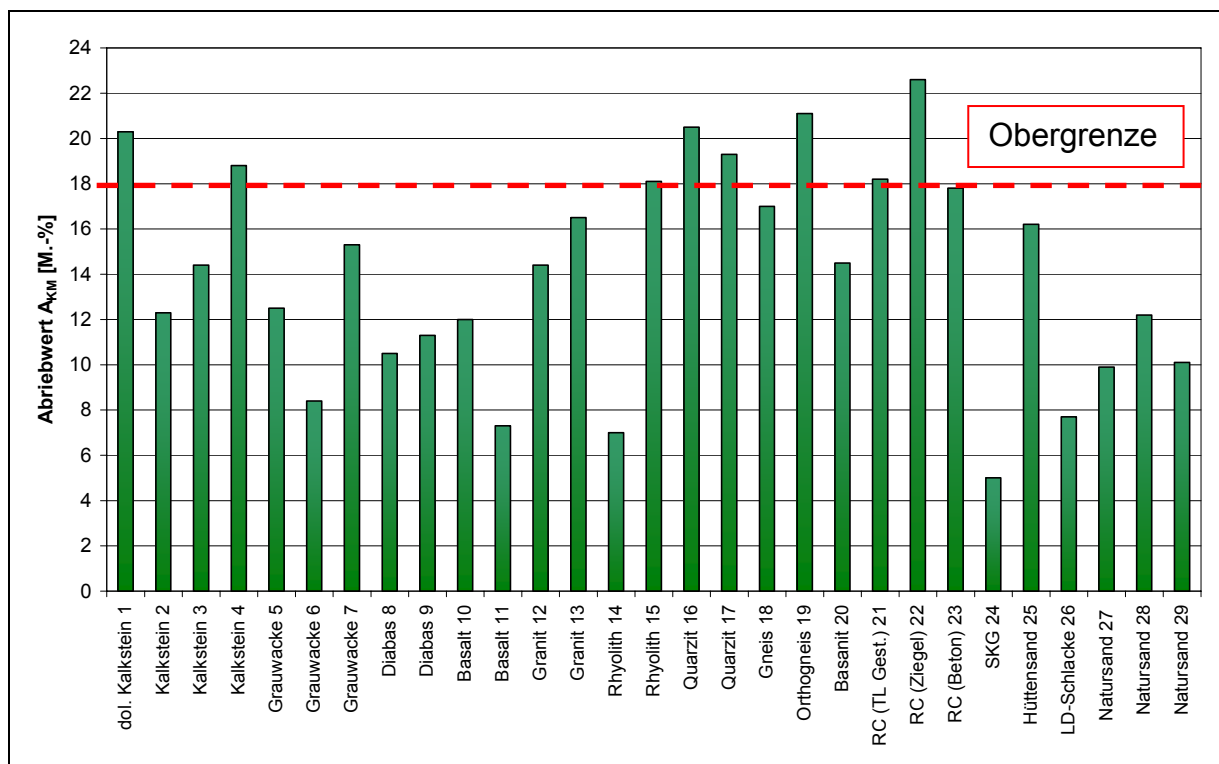


Abbildung 5-17: Obergrenze für den Abriebwert A_{KM} bei besonders hohen Verkehrslasten (Fugenmaterial)

Tabelle 5-10 enthält eine vergleichende Darstellung der Beurteilung der untersuchten Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von dem jeweiligen Prüfverfahren. Die Auswahl der Prüfverfahren und der Anforderungswerte beruhen auf den Vorgaben der ZTV Pflaster-StB 06 [30] für Verkehrsflächen mit besonderen Beanspruchungen sowie auf den in diesem Kapitel erörterten Anforderungen.

Tabelle 5-10: Beurteilung der Gesteinskörnungen

Regelwerk	ZTV Pflaster-StB 06		-	-
Prüfverfahren	Los Angeles-Verfahren nach DIN EN 1097-2	SZ-Verfahren nach DIN EN 1097-2	MMD-Verfahren 0/5	Prallprüfung an Sand nach den TP Min-StB
Anforderung	LA-Koeffizient ≤ 20 M.-%	SZ-Wert ≤ 18 M.-%	MMD-Koeffizient < 5 M.-%	$A_{KM} < 18$ M.-%
Prüfkörnung	10/14 mm	8/12 mm	0,25/5,6 mm	0,09/2,0 mm
Verwendung	Bettung	Bettung	Bettung	Fuge
K 1	-	-	-	-
K 2	-	-	+	+
K 3	+	+	-	+
K 4	-	-	-	-
GW 5	+	+	-	+
GW 6	+	+	+	+
GW 7	+	+	-	+
D 8	+	+	+	+
D 9	+	+	+	+
B 10	+	+	+	+
B 11	+	+	+	+
GR 12	-	+	+	+
GR 13	-	+	+	+
RHY 14	+	+	+	+
RHY 15	+	+	-	-
Q 16	+	+	+	-
Q 17	+	+	+	-
GN 18	+	+	+	+
OGN 19	+	-	+	-
BS 20	+	+	+	+
RCTL 21	o	o	+	-
RCZ 22	o	o	-	-
RCB 23	-	o	+	+
SKG 24	o	o	+	+
HS 25	o	o	o	+
LDS 26	+	+	+	+
NS 27	o	o	+	+
NS 28	o	o	+	+
NS 29	o	o	+	+

Legende:

+ = Anforderung erfüllt

- = Anforderung nicht erfüllt

o = Werte für jeweilige Gesteinskörnung liegen nicht vor

Unter Annahme der Gültigkeit der empfohlenen Anforderungswerte ergibt sich folgende Einstufung der Gesteinskörnungen:

Unabhängig vom Prüfverfahren werden die Kalksteine 1 und 4 als ungeeignet und die Grauwacke 6, die Diabase 8 und 9, die Basalte 10 und 11, der Rhyolith 14, der Gneis 18, der Basanit 20 sowie die LD-Schlacke als geeignet für die Verwendung als Bettungs- bzw. Fugenmaterial eingestuft.

Bei den weiteren Materialien besteht keine übereinstimmende Beurteilung. Insbesondere fallen die vom jeweiligen Prüfverfahren abhängigen Einstufungen bestimmter Gesteinsarten auf: Nach Vorgaben der ZTV Pflaster-StB 06 weisen beide Granite im Hinblick auf die Ergebnisse des Los Angeles-Verfahrens keine ausreichende Festigkeit auf, während die empfohlenen Anforderungswerte für das MMD-Verfahren zu einem Ausschluss der Grauwacken 5 und 7 führen. Die untersuchten Quarzite eignen sich angesichts der hohen Abriebwerte A_{KM} nicht als Fugenmaterial bei hohen Beanspruchungen.

Eine Umstellung des Regelwerkes zur Prüfung von Bettungsmaterial mit dem MMD-Verfahren hätte angesichts der in Tabelle 5-10 aufgeführten Ergebnisse im Wesentlichen eine Veränderung der Beurteilung der Granite und Grauwacken sowie einzelner weiterer Gesteinskörnungen zur Folge.

6 Bewertungshintergrund

6.1 Felduntersuchungen

Neben der labortechnischen Untersuchung von Gesteinskörnungen wurden zur Schaffung eines Bewertungshintergrundes insgesamt acht Verkehrsflächen in Pflasterbauweise im Raum Nordrhein-Westfalen untersucht.

Es wurden Flächen mit einer vergleichsweise hohen Verkehrsbelastung, die etwa der Bauklasse III entspricht, ausgewählt. Anliegerstraßen, Fußgängerzonen und Stellflächen waren nicht Bestandteil der Untersuchungen. Die Untersuchungen wurden mehrheitlich an Flächen mit Betonpflastersteinen durchgeführt. Dabei wurden Rechtecksteine als auch Verbundpflastersteine berücksichtigt. Nach Auskunft der Straßenbauverwaltung wurden bei den ausgesuchten Flächen Bettungsmaterialien mit abgestufter Korngrößenverteilung verwendet.

Die verschiedenen Flächen können in sogenannte Positiv- und Negativbeispiele unterteilt werden. Die Positivbeispiele sind gekennzeichnet durch das Fehlen maßgeblicher Schäden trotz langer Liegezeit und hohem Verkehrsaufkommen. Die als Positivbeispiele eingestuften Flächen sind zum Zeitpunkt der Probenahme in einem gebrauchstauglichen Zustand vorgefunden worden. Die zweite Gruppe der Negativbeispiele beinhaltet Pflasterflächen mit eingeschränkter bis fehlender Gebrauchstauglichkeit. Im Vergleich zu den Positivbeispielen liegen bei den als Negativbeispiel eingestuften Flächen maßgebliche Schäden vor, die eine weitere Nutzung beeinträchtigen oder die sich zum Zeitpunkt der Probenahme bereits im Zustand der Sanierung befanden.

Um die Veränderung des Bettungsmaterials durch die Verkehrsbelastung beurteilen zu können, wurde an jeder Fläche zwei Messpunkte ausgewählt. Nach Möglichkeit befand sich der Messpunkt 1 (MP 1) in einem schwächer belasteten Bereich, wogegen der Messpunkt 2 (MP 2) in einen unmittelbar belasteten Bereich der Fläche gelegt wurde. Als günstig für die Wahl des Messpunktes 1 erwiesen sich angrenzende Stellflächen oder sonstige nicht für den Verkehr zugängliche Stellen.

Die visuelle Begutachtung der Pflasterfläche wurde bei Vorliegen von Verformungen durch Messungen der Ebenheit ergänzt. Zudem wurde bei verschiedenen Flächen die Infiltrationsrate der Pflasterdecke und tieferer Schichten mit Hilfe des Tropfinfiltrimeters nach DIN 18130 [54] bestimmt.

Das vor Ort entnommene Bettungsmaterial wurde anschließend im Labor untersucht. Es wurden die Korngrößenverteilung, die Rohdichte und die Abriebwiderstände mit dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2 und dem MMD-Verfahren 0/5 bestimmt. Weiterhin wurde eine visuelle Bestimmung der verwendeten Gesteinskörnungen vorgenom-

men.

6.1.1 Positivbeispiele

6.1.1.1 Beispiel P1

Die Fläche ist eine Hauptsammelstraße, die durch regelmäßigen Busverkehr sowie Pkw-Verkehr belastet wird. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war die Fläche etwa 12 Jahre alt (Baujahr: 1994) und wies keine maßgeblichen Schäden auf (Bilder 6-1 und 6-2).



Bild 6-1: Ansicht



Bild 6-2: Busverkehr

Der Gesamtzustand der Fläche ist in Anbetracht der Liegedauer und Belastung durch regelmäßigen Busverkehr als sehr gut zu betrachten. Messpunkt 1 (Bild 6-3) wurde im Einmündungsbereich einer Anliegerstraße am Straßenrand gewählt. Die dort vorhandene Verkehrsbelastung war sehr gering im Vergleich zur Hauptfahrbahn, wobei der gleiche Aufbau vorlag. Messpunkt 2 (Bild 6-4) wurde unmittelbar im Bereich der Fahrspur angeordnet.



Bild 6-3: Einrichtung MP1



Bild 6-4: Einrichtung MP2

Die Pflasterdecke ist, wie in Bild 6-5 zu erkennen, in einer Kombination aus Rechtecksteinen (15,5 cm x 23,0 cm) und Quadratsteinen (15,5 cm x 15,5 cm) ausgeführt.



Bild 6-5: Verband der Fläche P1

- Entnahme der Proben

Nach Öffnung der Pflasterdecke zeigte sich, dass die Bettung im belasteten und unbelasteten Bereich in einem lockeren, nicht verfestigtem Zustand vorlag und mühelos entnommen werden konnte (Bilder 6-6 und 6-7).



Bild 6-6: Bettung MP1



Bild 6-7: Bettung MP2

Die Dicke der Bettung wurde an mehreren Stellen gemessen und betrug zwischen 4,0 und 4,5 cm. Als Besonderheit bei der untersuchten Fläche ist die unter der Bettungsschicht gelegene asphaltgebundene Tragschicht (ATS) zu erwähnen.

Die auf der Pflasterdecke im belasteten und unbelasteten Bereich durchgeführte Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit zeigte, dass die Decke nahezu undurchlässig war. Eine weitere Messung wurde auf der Oberkante der Asphalttragschicht durch-

geführt und ergab eine Infiltrationsrate von 1.100 l/s*ha, was einer hohen Versickerungsfähigkeit entspricht.

- Laboruntersuchungen

Die im Labor durchgeführten Untersuchungen der vor Ort entnommenen Proben aus der Bettung ergaben, dass an den Messpunkten 1 und 2 vermutlich eine Grauwacke der Körnung 2/5 mm mit einer Rohdichte zwischen 2,712 g/cm³ und 2,728 g/cm³ für die Bettung verwendet wurde.

Die Korngrößenverteilungen der Bettungsmaterialien und der empfohlene Grenzbereich nach dem M FP 1 [46] sind in Abbildung 6-1 dargestellt.

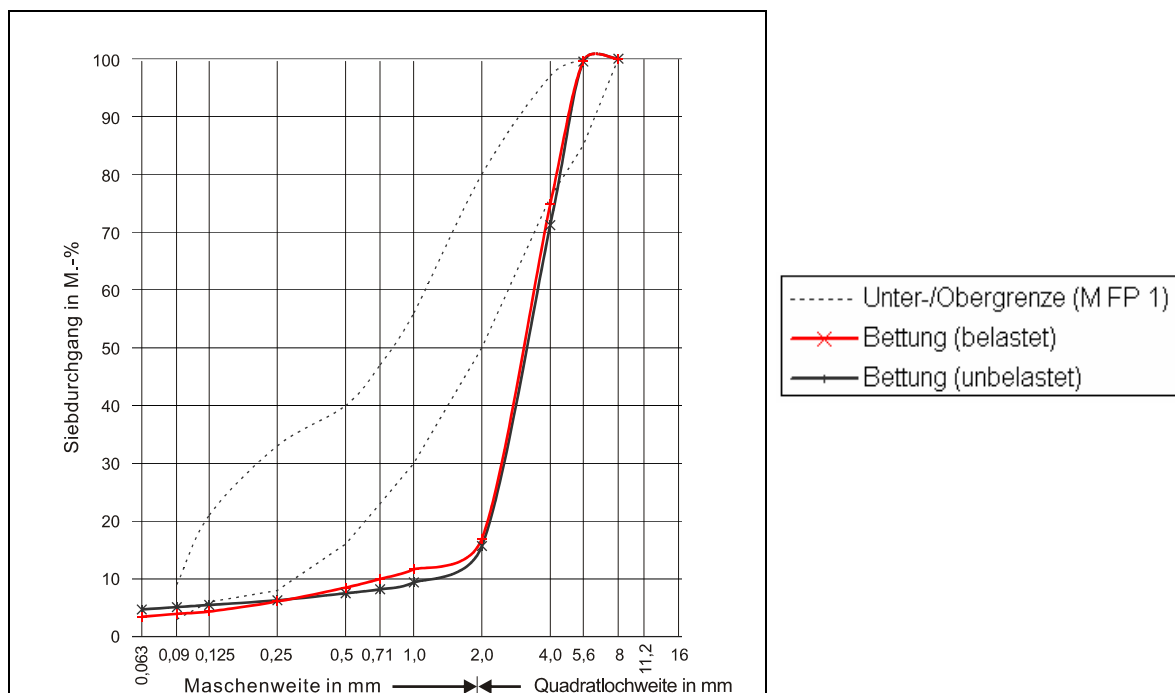


Abbildung 6-1: Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials im unbelasteten Bereich (schwarz) und im belasteten Bereich (rot)

Wie die Abbildung zeigt, weisen die beiden Verteilungen relativ geringe Abweichungen auf, die vermutlich auf Schwankungen innerhalb der Bettung zurückgeführt werden können.

Da die Körnung 2/5 mm des Bettungsmaterials zu grob für die Durchführung des Kugelmühlen-Verfahrens war, wurde sie nachträglich durch schlagende Beanspruchung vorsichtig verfeinert. Das so gewonnene feinere Material der Messpunkte 1 und 2 wurde in der Kugelmühle geprüft. Der Abriebwert des schwach belasteten Bettungsmaterials beträgt $A_{KM} = 10,6$ M.-%, der Wert des belasteten Materials liegt bei $A_{KM} = 10,2$ M.-%. Hierbei gilt zu bedenken, dass die nachträglich durchgeführte Zerkleinerung des Materials Einfluss auf die Abriebfestigkeit haben könnte. Die Probe 0,25/5,6 mm für das MMD-Verfahren 0/5 wurde durch Siebung

einer größeren Menge an Bettungsmaterial ohne zusätzliche mechanische Zerkleinerung wie bei dem Kugelmühlen-Verfahren gewonnen. Das MMD-Verfahren nach Methode „A“ ergab Werte von 6,6 M.-% (unbelastet) und 5,8 M.-% (belastet).

6.1.1.2 Beispiel P2

Untersucht wurde eine gepflasterte Einkaufsstraße mit regelmäßig verkehrendem Pkw- und Anlieferverkehr. Die Fläche wurde bereits im Jahr 2000 saniert, womit die Liegezeit zum Zeitpunkt der Untersuchungen etwa 6 Jahre betrug.

Die Begehung der Fläche ergab, abgesehen von leichten horizontalen Verschiebungen der Pflastersteine, keine gravierenden Schäden.

Messpunkt 1 befand sich außerhalb des regelmäßig befahrenen Bereichs im Halteverbot vor einem Geschäft. Messpunkt 2 wurde nach Beobachtung der von den Fahrzeugen gewählten Spur in den häufig belasteten Bereich gelegt (Bilder 6-8 bis 6-11).

Abbildung 6-11 zeigt die verwendeten quadratischen Steine (19,5 cm x 19,5 cm) mit einer Dicke von 12 cm, welche im Läuferverband quer zur Fahrtrichtung verlegt wurden. An beiden Messpunkten wurden leichte Unterschreitungen der erforderlichen Fugenbreite festgestellt.



Bild 6-8: Ansicht MP1



Bild 6-9: Entnahme von Proben (MP1)

**Bild 6-10:** Ansicht MP2**Bild 6-11:** Entnahme von Proben (MP2)

- Entnahme der Proben

Bild 6-12 zeigt die nach Entnahme der Pflastersteine zugängliche Oberfläche der Bettung im belasteten Bereich. Es wurden die charakteristischen hellen Verfärbungen und eingetragenes Feinkorn im Bereich der Fugen festgestellt. Die Verfärbungen lagen auch im unbelasteten Bereich vor, wiesen aber eine leicht dunklere Farbe auf.

**Bild 6-12:** Oberfläche der Bettung im belasteten Bereich

Die Bettung war an beiden Messpunkten nicht verfestigt und konnte ohne Hilfsmittel entnommen werden. Die Dicke der Bettung lag im schwach belasteten Bereich zwischen 2,5 und 3,5 cm; im belasteten Bereich wurde eine Dicke von etwa 4,5 cm gemessen.

Das Tropfinfiltrometer wurde auf der Pflasterdecke im belasteten Bereich und auf der Oberkante der Tragschicht im schwach belasteten Bereich eingesetzt. Die Auswertung der Messdaten ergab eine vergleichsweise hohe Infiltrationsrate der Decke von 330 l/s*ha sowie der Tragschicht mit 950 l/s*ha. Der Aufbau ist im Hinblick auf die ermittelten Werte als ausreichend wasserdurchlässig einzustufen.

- Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen ergaben, dass für die Bettung vermutlich eine Körnung 0/5 verwendet wurde. Abbildung 6-2 zeigt die Korngrößenverteilungen der Proben aus dem unbelasteten (schwarz) und belasteten (rot) Bereich, wobei das Bettungsmaterial im belasteten Bereich erkennbar feinkörniger ausfällt.

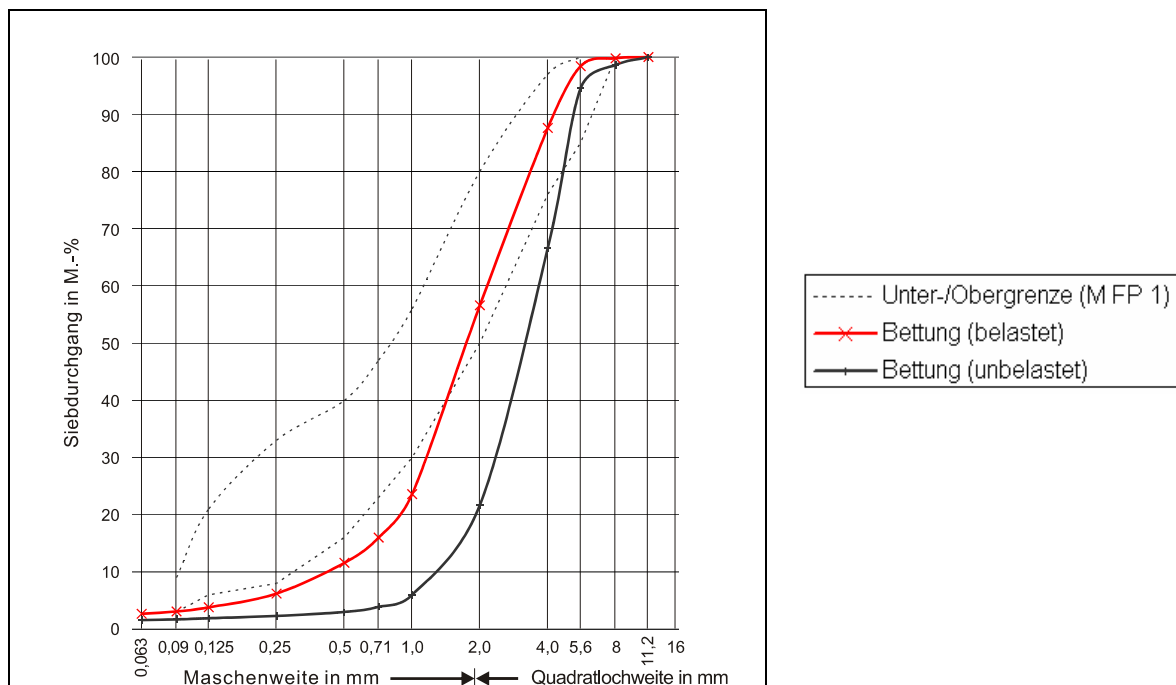


Abbildung 6-2: Korngrößenverteilungen der Bettung im belasteten und unbelasteten Bereich

Die augenscheinliche Begutachtung des Materials zeigte, dass das Bettungsmaterial vermutlich aus Grauwacke und Schmelzkammergranulat zusammengesetzt wurde.

Die Rohdichte der Bettungsmaterialien wies entgegen der einheitlichen Komponenten an den beiden Messpunkten deutlich abweichende Werte von 2,685 g/cm³ (MP 1) bis 2,816 g/cm³ (MP 2) auf.

Die Durchführung des Kugelmühlen-Verfahrens an Proben 0/2 mm ergab Abriebwerte von $A_{KM} = 8,1$ M.-% im unbelasteten und $A_{KM} = 8,6$ M.-% im belasteten Bereich. Die mit dem MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „A“ ermittelten

Abriebwiderstände betragen 2,8 M.-% (belastet) und 2,4 M.-% (unbelastet).

6.1.1.3 Beispiel P3

Bei der in Bild 6-13 gezeigten Straße handelt es sich um eine gepflasterte Einkaufsstraße, die vor etwa 10 Jahren saniert wurde. Die Belastung lag in Form von regelmäßigem Pkw- und Anlieferverkehr vor. Zudem befand sich eine in Abbildung 6-14 gezeigte regelmäßig frequentierte Haltestelle für Taxen in unmittelbarer Nähe der Messpunkte. Busverkehr wurde nicht festgestellt.

Die Pflasterfläche wurde mit Rechtecksteinen (9,5 cm x 19,5 cm) der Dicke 8 cm ausgeführt; die Verlegung erfolgte im Läuferverband, quer zur Verkehrsrichtung verlegt.

Die Begehung der Fläche zeigte keine maßgeblichen Schäden. Es wurden leichte horizontale Verschiebungen sowie leichte Spurrinnen festgestellt, die die Gebrauchstauglichkeit der Fläche nicht einschränkten. Im Bereich des Messpunktes wurde auf der langen Seite der Pflastersteine die erforderliche Fugenbreite überwiegend unterschritten, während an den schmalen Seiten die gemessene Fugenbreite den Anforderungen entsprach.



Bild 6-13: Untersuchung der Straße



Bild 6-14: Haltestelle für Taxen

Proben aus dem unbelasteten Bereich der Fahrbahn konnten nicht entnommen werden, da bei der Öffnung der Pflasterdecke an mehreren schwach belasteten Stellen ein anderes Bettungsmaterial oder anderer Aufbau als im Bereich der Fahrspur festgestellt wurde.

- Entnahme der Proben

Nach Entnahme der Pflastersteine sowie des anhaftenden Fugenmaterials konnte die Bettung begutachtet werden (Bild 6-15). Deutlich zeichnet sich das an dem Verlauf der Fugen orientierte Muster auf der Oberseite der Bettung ab. Die Entnahme der Probe erwies sich als schwierig, da das Gemisch in stark verfestigter Form vorlag und nur mit Hilfe von Werkzeugen aufgelockert werden konnte. Die an verschiedenen Stellen gemessene Dicke der Bettung betrug 5 bis 6 cm.



Bild 6-15: Bettungsschicht mit Muster

Die Bestimmung der Infiltrationsrate auf der Oberkante des Pflasters und der Tragschicht ergab erwartungsgemäß; dass der Aufbau wasserundurchlässig war.

- Laboruntersuchungen

Aus der im Labor bestimmten Korngrößenverteilung kann gefolgert werden, dass ein Korngemisch 0/4 mm zur Herstellung der Bettung eingesetzt wurde, siehe Abbildung 6-3.

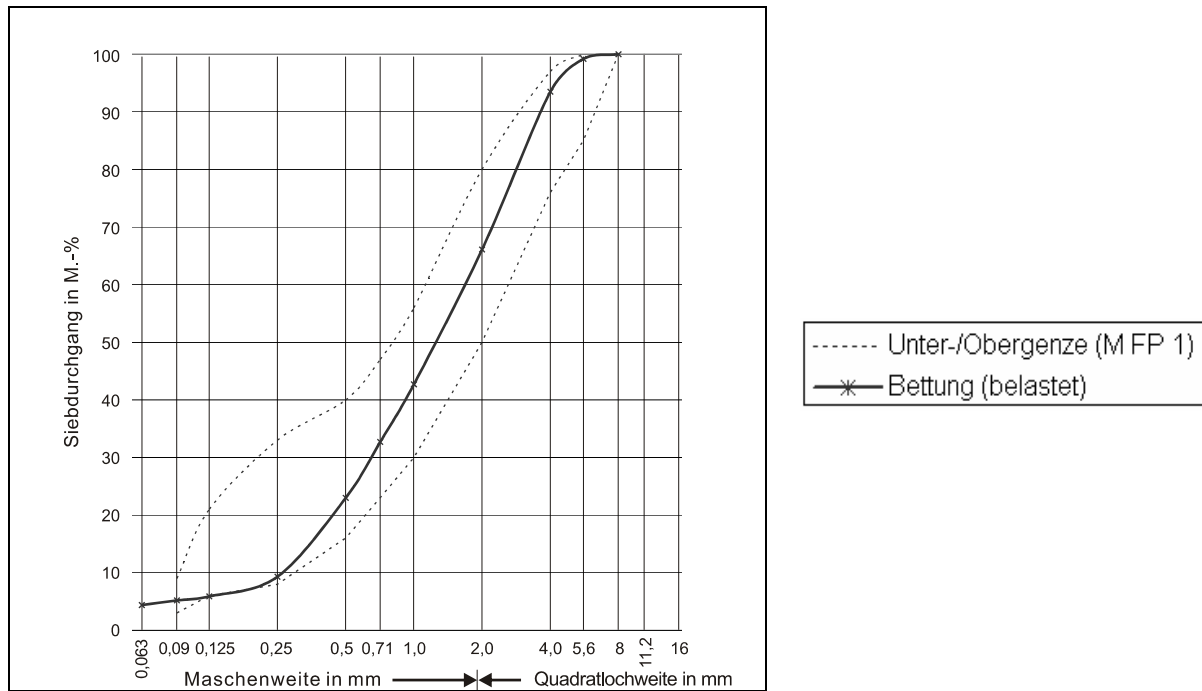


Abbildung 6-3: Korngrößenverteilung des belasteten Bettungsmaterials

Das Gemisch setzt sich nach augenscheinlicher Untersuchung aus den Komponenten Schmelzkammergranulat (ca. 70 M.-%), Hochofenschlacke (ca. 20 M.-%) sowie Hüttensand und Natursand (ca. 10 %) zusammen.

Die Rohdichte des Gemisches wurde zu 2,596 g/cm³ ermittelt.

Die untersuchte Probe aus dem belasteten Bereich wies Abriebwerte von $A_{KM} = 9,3$ M.-% (Kugelmühlen-Verfahren) und 2,6 M.-% (MMD-Verfahren, Methode „A“) auf.

6.1.1.4 Beispiel P4

Bei der vierten Fläche mit positiven Erfahrungen handelt es sich um einen gepflasterten Teilabschnitt, der als Einfahrt zu einem angrenzenden Gewerbegebiet dient (Bild 6-16). Für die Herstellung der Decke wurden, wie das Bild 6-17 zeigt, Verbundpflastersteine mit einer Dicke von 12 cm verlegt.

Das Baujahr wurde mit 1998 angegeben, womit sich die Liegezeit zum Zeitpunkt der Untersuchungen auf 8 Jahre belief.

Die Fläche wurde durch regelmäßigen Verkehr belastet. Entsprechend der Nutzung als Zugang zum angrenzenden Gewerbegebiet wurde während der Untersuchungen vor Ort ein hoher Schwerverkehrsanteil festgestellt.

**Bild 6-16:** Ansicht der Fläche**Bild 6-17:** Verbundsteine und Verband

Die augenscheinliche Untersuchung der Fläche ergab einen insgesamt guten Eindruck des Zustands. In einem Teilstück im Einmündungsbereich zu der kreuzenden Straße wurden leichte Schäden in Form von Setzungen und aufgeweiteten Fugen festgestellt.

Messpunkt 1 wurde im durch einen Poller abgesperrten Bereich eines Halteverbotes eingerichtet, wogegen sich der Messpunkt 2 im Bereich der Fahrspur befand. Die Positionen der Messpunkte sind aus Bild 6-18 und 6-19 ersichtlich.

**Bild 6-18:** Ansicht MP1**Bild 6-19:** Ansicht MP2

- Entnahme der Proben

Die Öffnung der Pflasterdecke und anschließende Entnahme von Bettungsmaterial zeigte, dass das leicht rötliche Bettungsmaterial im unbelasteten Bereich nicht verfestigt und im belasteten Bereich geringfügig verfestigt vorlag.

In Bild 6-20 ist die Oberseite der Bettungsschicht nach Öffnung der Decke im schwach belasteten Bereich des Messpunktes 1 dargestellt. Die Oberseite weist eine dunkle Musterung entsprechend dem Verlauf der Fugen auf. Die Dicke der Bettung verlief an beiden Messpunkten gleichmäßig zwischen 2,5 bis 3,0 cm.



Bild 6-20: Bettung im unbelasteten Bereich

Auf der Oberkante der Pflasterdecke und der Tragschicht konnte keine relevante Versickerung des Wassers nachgewiesen werden. Das im Ring des Tropfinfiltrimeters stehende Wasser zeugte von der Undurchlässigkeit des Aufbaus im belasteten und unbelasteten Bereich.

- Laboruntersuchungen

Die Untersuchung der Proben im Labor ergab, dass ein Gemisch der Körnung 0/5 mm bis 0/4 mm aus RC-Baustoffen (Ziegel u. a.) und Natursand als Bettungsmaterial verwendet wurde.

Die Korngrößenverteilungen der Proben sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Sie weisen nur geringfügige Abweichungen auf, die auf nicht vermeidbare Schwankungen der Materialien und Messungen zurückgeführt werden können.

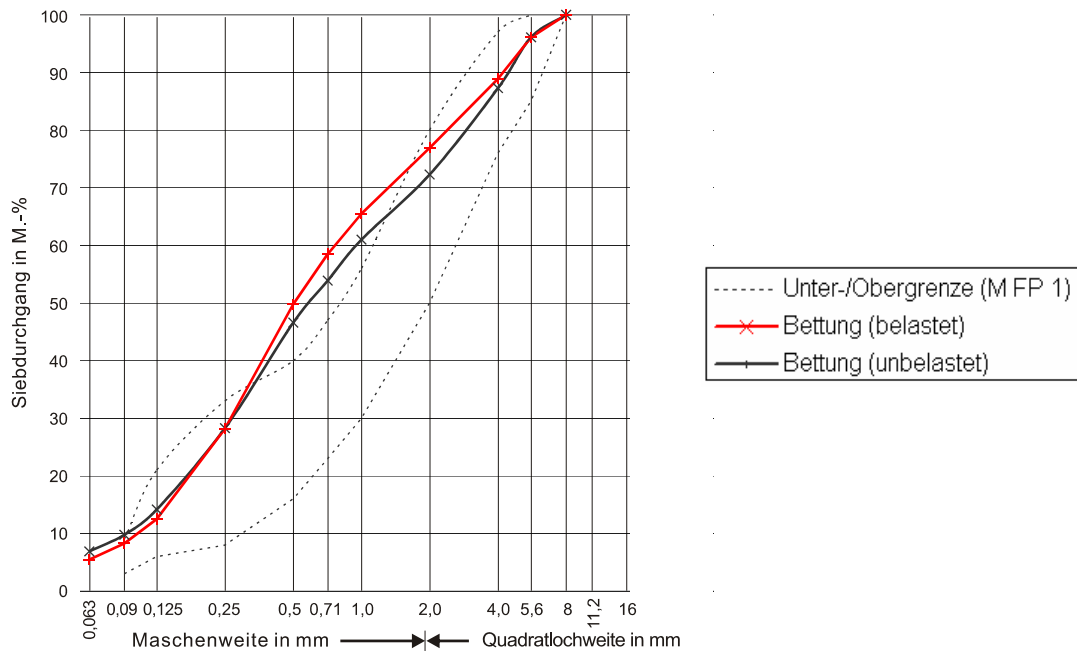


Abbildung 6-4: Korngrößenverteilung des belasteten (rot) und unbelasteten (schwarz) Bettungsmaterials

Der Abriebwert A_{KM} wurde im unbelasteten Bereich zu $A_{KM} = 15,6$ M.-% und im belasteten Bereich zu $A_{KM} = 15,2$ M.-% bestimmt. Das MMD-Verfahren nach Methode „A“ ergab Werte von 4,0 M.-% (unbelastet) und 3,8 M.-% (belastet).

6.1.1.5 Beispiel P5

Ergänzend zu den bisherigen Beispielen wurde eine Pflasterfläche in historischer Bauweise gewählt. Als Pflastersteine wurden Natursteine verwendet, die im Bogenverband verlegt wurden. In den Bereichen der Probeentnahmestellen entspricht die Pflasterbefestigung vermutlich der Ausführung im Baujahr zwischen 1915-1928. Relevante Erhaltungsmaßnahmen wurden nach Auskunft des zuständigen Tiefbauamtes in den letzten Jahrzehnten nicht durchgeführt.

Die in Bild 6-21 gezeigte Straße liegt in unmittelbarer Nähe zur Messe und ist deswegen zu Messezeiten stark frequentiert. Des Weiteren dient sie als Ausweichstrecke zu einer Bundesstraße, die parallel verläuft, und stellt damit eine wichtige Nord-Süd-Verbindung dar.

Laut Auskunft des Tiefbauamtes ist die Pflasterbefestigung folgendermaßen aufgebaut:

Granitkleinpflaster (9/11)	10 cm
Sandbettung	5 cm
Kleinschlag	10 cm
Setzpacklage	15-20 cm



Bild 6-21: Ansicht P 5

Die verwendeten Natursteine und ihre Maße sind in den Bildern 6-22 und 6-23 dargestellt.

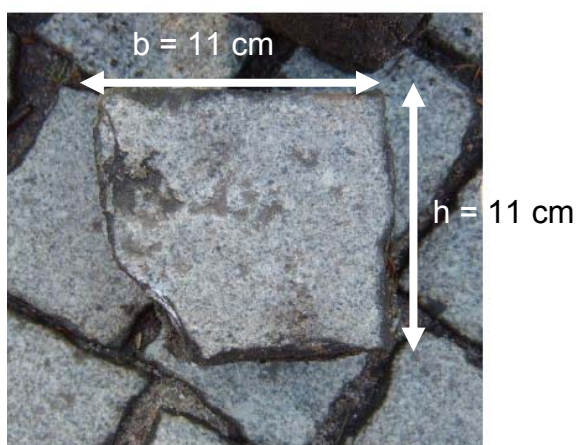


Bild 6-22: Naturstein Oberseite

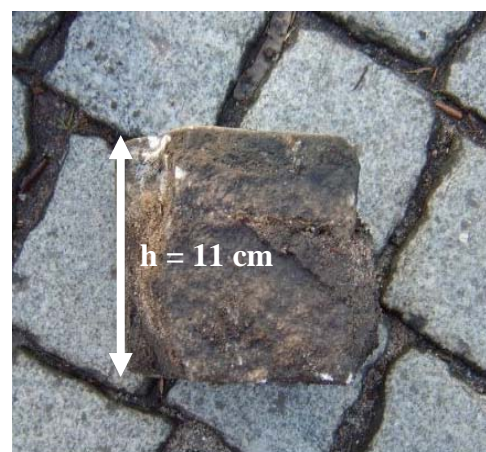


Bild 6-23: Steinunterseite

Im Jahr 1991 betrug nach Auskunft des zuständigen Tiefbauamtes die durchschnittliche Verkehrsbelastung 4641 Kfz/24 h je Fahrtrichtung (stadteinwärts), wovon etwa

4 % der Fahrzeuge dem Schwerverkehr zuzuordnen waren. 2006 wurde zu Messezeiten eine Belastung von 12.767 Kfz/ 24 h und Richtung gemessen. Der Schwerverkehrsanteil lag bei etwa 2 %.

Insgesamt wurden Proben an drei verschiedenen Stellen entnommen. Der erste Messpunkt lag im unbefahrenen Bereich hinter der Ausbuchtung für einen Fußgängerüberweg. Die Entnahmestelle ist in Bild 6-24 mit einer roten Markierung gekennzeichnet.



Bild 6-24: Messpunkt 1

Messpunkt 2 befand sich in der rechten Spur (stadteinwärts) mit regelmäßiger Verkehrsbelastung (Bild 6-25).



Bild 6-25: Messung der Ebenheit am Messpunkt 2

Der dritte und der vierte Messpunkt befanden sich im Bereich vor der in Bild 6-26 gezeigten Lichtsignalanlage. Messpunkt 3 wurde aufgrund seiner Lage nahe des Straßenrandes vermutlich nur geringfügig belastet, wogegen bei Messpunkt 4 Proben aus dem Bereich der Fahrspur entnommen wurden. Die Lage der Messpunkte 3 und 4 ist in Bild 6-27 eingezeichnet.



Bild 6-26: Lichtsignalanlage im Bereich der Messpunkte 3 und 4

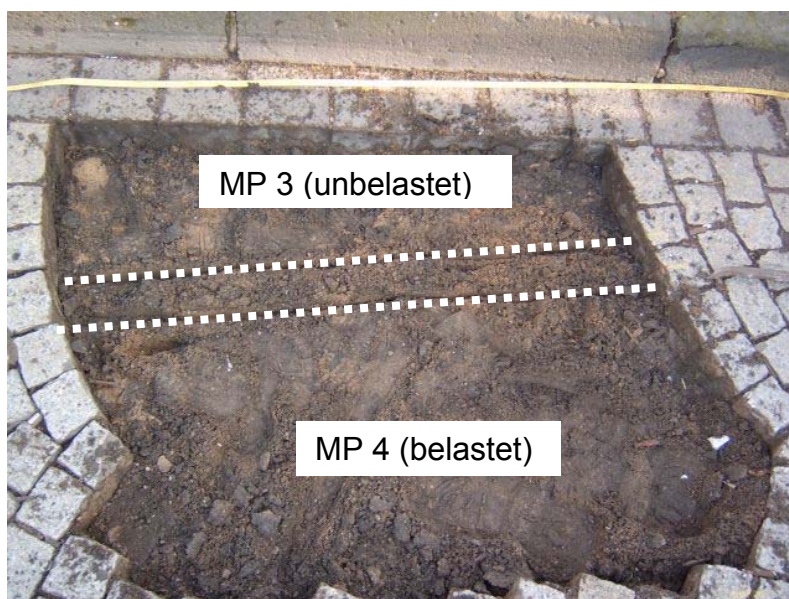


Bild 6-27: Lage der Messpunkte 3 und 4

- Entnahme der Proben

Messpunkt 1

Die Dicke der Bettung am Messpunkt 1 betrug etwa 6,0 cm. Als Bettungsmaterial wurde ein Natursand 0/2 verwendet. In den Bildern 6-28 und 6-29 sind die Entnahmestelle und die Oberfläche der Bettung am Messpunkt 1 ersichtlich. Unterhalb der Bettung befand sich eine Schicht mit größerem Material.

Die Überprüfung der Ebenheit der Pflasterdecke im Bereich der Fahrspur ergab eine gering ausgeprägte Spurrinne von ca. 1,5 cm.



Bild 6-28: Öffnung Pflasterdecke **Bild 6-29:** Oberfläche der Bettung am MP 1

Messpunkt 2

Der Aufbau und die verwendeten Materialien stimmten mit denen am Messpunkt 1 überein, lediglich die Bettung wies eine geringere Dicke von etwa 5,5 cm auf.

Messpunkte 3 und 4

Die Entnahme der Proben erfolgte gemäß der o. g. Beschreibung im Bereich der Fahrspur und in der Nähe des Fahrbahnrandes. Für die etwa 4,5 cm starke Bettung wurde ein Natursand verwendet, der den an den Messpunkten 1 und 2 entnommenen Proben entsprach.

Die Messung der Ebenheit über den gesamten Fahrstreifen ergab geringfügige Setzungen in den beiden Fahrspuren mit einem Höchstwert von 1,1 cm Abweichung von der Horizontalen (Bild 6-30).



Bild 6-30: Ebenheit der Pflasterdecke am MP 3 und MP 4

- Laboruntersuchungen

Die entnommenen Proben wurden im Labor hinsichtlich ihrer Abriebbeständigkeit mit dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2 untersucht. Das dem unbelasteten Bereich am Messpunkt 1 entnommene Material wies einen Abriebwert von $A_{KM} = 10,6$ M.-% auf, im belasteten Bereich von Messpunkt 2 wurde ein Abriebwert $A_{KM} = 13,4$ M.-% festgestellt. Der Abriebwert der vor der Lichtsignalanlage entnommenen Bettungsmaterialien betrug im Bereich des schwach belasteten Straßenrandes (MP3) $A_{KM} = 11,0$ M.-% und im belasteten Bereich (MP4) $A_{KM} = 10,9$ M.-%. Mit dem MMD-Verfahren nach Methode „A“ wurden Abriebwerte von 3,4 M.-% (unbelastet MP1), 3,2 M.-% (belastet MP2) sowie 3,4 M.-% (unbelastet MP3) und 3,5 M.-% (belastet MP4) festgestellt.

6.1.2 Negativbeispiele

6.1.2.1 Beispiel N1

Bei der ersten Fläche handelt es sich um eine Einkaufsstraße mit angrenzenden Geschäften. Die Fläche wurde durch regelmäßigen Anliefer- und Pkw-Verkehr belastet. Außerdem wurde eine Buslinie über die Fläche geführt.

Die Fläche wurde mit quadratischen Pflastersteinen 14,5 cm x 14,5 cm mit einer Dicke von 14,0 cm diagonal im Kreuzverband verlegt.

Die zum Zeitpunkt der Untersuchungen etwa sechs Jahre alte Fläche wurde bei Probenahme (Bild 6-31) saniert. Die Erneuerung der Fläche wurde aufgrund gravierenden Verformungen der Befestigung, der Entleerung der Fugen und der horizontalen Verschiebungen der Steine erforderlich.



Bild 6-31: Sanierung der Pflasterfläche

Die Bilder 6-32 und 6-33 zeigen die bei Begehung der Fläche festgestellten Schäden in Form von Spurrinnen mit einer Tiefe von bis zu 6,5 cm sowie die deutlichen Schwankungen der Fugenbreite und des Fugenverlaufs.

Zudem wurde im Bereich der Fahrspur die aus der Literatur bekannte (s. Kapitel 2) Anreicherung von Feinkorn auf der Oberseite der Pflastersteine in Form einer hellen getrockneten Schlämme festgestellt. Ebenfalls in Bild 6-33 ist die weiße feinkörnige Masse auf den Steinen gut zu erkennen.

**Bild 6-32:** Ansicht Spurrinne**Bild 6-33:** Austrag Schlämme

Die bei der Sanierung freigelegte Oberfläche der Tragschicht wies vertikale Verformungen im Bereich der Spurrinnen auf. Nach Aussage des zuständigen Tiefbauamtes wurde ein Untergrund aus bindigem Boden mit hohem Wassergehalt festgestellt.

Es wurde das vor der Sanierung verwendete Bettungsmaterial an zwei Messpunkten entnommen. Die Lage des ersten Messpunktes wurde in der Mitte des gesamten Querschnitts außerhalb der Fahrspur gewählt, während Messpunkt 2 sich im belasteten Bereich der Fahrspur befand. Am ersten Messpunkt ist von einer schwachen Verkehrsbelastung auszugehen.

- Entnahme der Proben

Das Bettungsmaterial lag in stark verfestigter Form vor und konnte nur mit Hilfe größerer mechanischer Energie gelöst werden.

Die Infiltrationsrate wurde an zwei Stellen im belasteten Bereich bestimmt. Auf der Oberkante der Pflasterdecke ergab sich eine Infiltrationsrate von 175 l/s*ha, auf der Oberkante der Bettung wurde eine Rate von 200 l/s*ha festgestellt.

- Laboruntersuchungen

Das Bettungsmaterial erwies sich nach augenscheinlicher Untersuchung und Berührung mit Salzsäure als Kalkstein.

Abbildung 6-5 zeigt die Korngrößenverteilungen des Bettungsmaterials im unbelasteten Bereich (schwarz) und im belasteten Bereich (rot). Beide Materialien weisen vergleichsweise geringe Feinkornanteile auf, wobei der Feinkornanteil im belasteten Bereich wider Erwarten geringer ausfällt. Als Ausgangsmaterial wurde vermutlich ein Gemisch 0/5 mm verwendet.

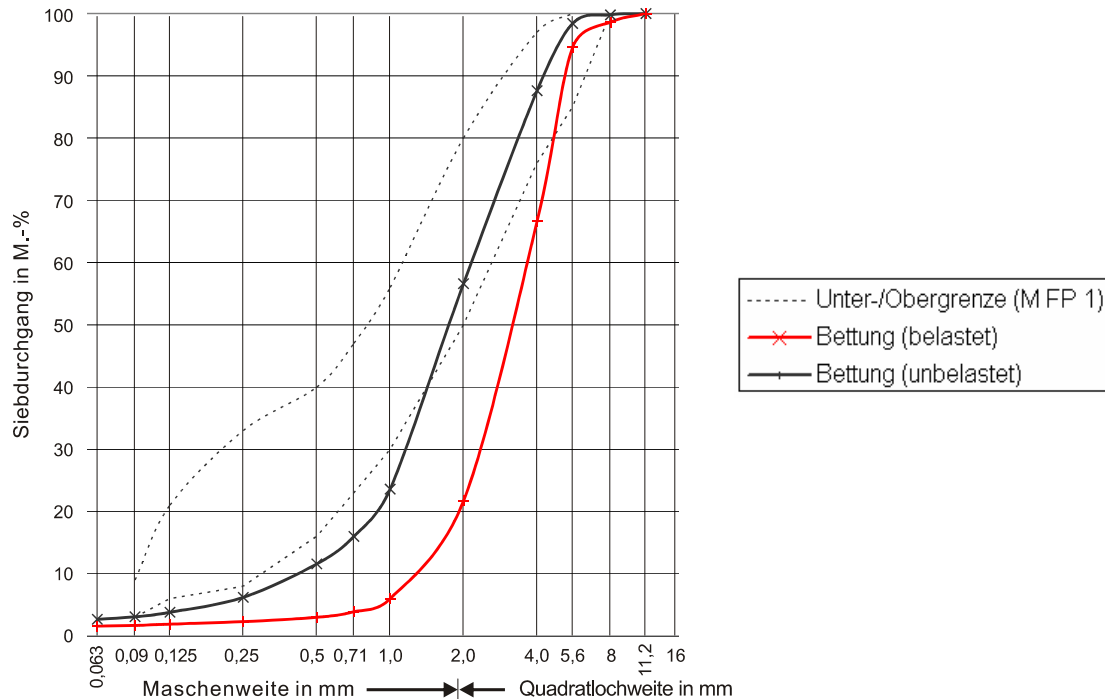


Abbildung 6-5: Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials

Im schwach belasteten Bereich beträgt der Abriebwert des Bettungsmaterials $A_{KM} = 9,4$ M.-%; im belasteten Bereich $A_{KM} = 8,9$ M.-%. Das MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „A“ ergab Abriebwerte von 3,8 M.-% (unbelastet) und 3,4 M.-% (belastet).

6.1.2.2 Beispiel N2

Auf der im Jahr 1983 gebauten Straße (Bild 6-34) verkehren drei Linienbusse in regelmäßiger Taktung. Nach Auskunft des zuständigen Tiefbauamtes betrug der DTV im Jahr 2006 14770 Kfz/24 h je Fahrtrichtung, wobei der Schwerverkehrsanteil zu rund 1,5 % ermittelt wurde.

Die Straße wurde in der Pflasterbauweise mit Verbundpflastersteinen mit einer Dicke von 8 cm hergestellt (Bild 6-35). Die Pflasterdecke wies an verschiedenen Stellen Spurrinnen oder flächige Einsenkungen auf. Bei bereits sanierten Flächen wurden zum Zeitpunkt der Untersuchung erneut Schäden festgestellt.

**Bild 6-34:** Ansicht der Fläche N2**Bild 6-35:** Verbundpflasterstein

Messpunkt 1 befand sich im schwach belasteten Bereich vor dem im Bild 6-36 gezeigten Tropfen. In diesem Bereich wurden keine maßgeblichen Schäden der Pflasterdecke festgestellt.

Der Messpunkt 2 (Bild 6-37) wurde im Bereich der Fahrspur der stadteinwärts führenden linken Fahrbahn angeordnet. Die Messung der Ebenheit mit der 4 m-Latte ergab Einsenkungen bis zu einem Höchstbetrag von etwa 2,5 cm.

Zusätzlich wurde ein dritter Messpunkt im Bereich einer an dieser Straße gelegenen Haltestelle mit regelmäßigem Busverkehr eingerichtet. Die Begehung der Fläche ergab eine weitgehende Entleerung der Fugen im Bereich der Fahrspur (Bilder 6-38 und 6-39).

**Bild 6-36:** Ansicht MP1
(schwach belastet)**Bild 6-37:** Ansicht MP2 (belastet)

**Bild 6-38:** Ansicht MP3**Bild 6-39:** Busverkehr MP3

Die Bilder 6-40 und 6-41 zeigen die maßgeblichen festgestellten Mängel in Form von Setzungen bis zu 2,5 cm in der Fahrspur und Entleerung der Fugen im Bereich der Fahrspur der Bushaltestelle.

**Bild 6-40:** Setzungen (MP2)**Bild 6-41:** Fugenentleerung (MP3)

- Entnahme der Proben

Messpunkt 1

Die nach Öffnung der Decke im Bereich des Messpunktes 1 freigelegte Oberfläche der Bettung ist im Bild 6-42 zu sehen. Als Bettungsmaterial wurde ein Natursand verwendet. Bild 6-43 zeigt die Messung der Dicke der Bettungsschicht. Abweichend zu den Vorgaben des Tiefbauamtes wurde eine Dicke von 6,5 cm festgestellt, die über dem zulässigen Höchstwert von 5 cm liegt.

**Bild 6-42:** Oberfläche Bettung MP1**Bild 6-43:** Bettung MP1

Das Bettungsmaterial wurde entfernt und die darunter liegende Oberfläche der Schottertragschicht freigelegt. Nach augenscheinlicher Einschätzung wurde Kalkstein zur Herstellung der Tragschicht verwendet. Auf eine weitere Untersuchung des Aufbaus wurde verzichtet. Laut Auskunft des Tiefbauamtes wurde die Schottertragschicht mit einer Dicke von 20 cm ausgeführt; darunter befindet sich eine 20 cm starke Kiesschicht.

Messpunkt 2

Am zweiten Messpunkt (Bild 6-44) im Bereich der Fahrspur wurde ein dem ersten Messpunkt entsprechender Aufbau mit einer Bettung aus Natursand festgestellt. Die Messung der Bettungsdicke (Bild 6-45) ergab eine Dicke von bis zu 7 cm, womit auch im stark befahrenen Bereich deutliche Überschreitungen der zulässigen Bettungsdicke vorlagen.



Bild 6-44: Oberfläche Bettung MP2



Bild 6-45: Bestimmung der Dicke der Bettung (MP2)

Die am Messpunkt 3 im Bereich der Bushaltestelle verwendeten Materialien sowie der Aufbau entsprachen den an den vorherigen Messpunkten festgestellten Gegebenheiten.

Bild 6-46 zeigt die nach Entnahme der Pflastersteine freigelegte Oberfläche der Bettung. Die oberflächennahen Bereiche der Bettung wiesen dunkle Verfärbungen auf (Bild 6-46 und 6-47). Die Dicke der Bettung betrug etwa 7,5 cm und liegt damit deutlich über den zulässigen Höchstwerten nach den ZTV Pflaster-StB [30]. Unterhalb der Bettung befand sich die Schottertragschicht aus Kalkstein.



Bild 6-46: Oberfläche Bettung MP3



Bild 6-47: Messung der Bettung MP3

- Laboruntersuchungen

Die augenscheinliche Bestimmung der Gesteinsart ergab, dass für die Bettung ver-

mutlich ein Natursand (Rheinsand) verwendet wurde.

Der Abriebwert des Bettungsmaterials im unbelasteten Bereich des Messpunktes MP1 beträgt $A_{KM} = 11,5$ M.-%. Im belasteten Bereich des Messpunktes MP2 wurde ein Wert von $A_{KM} = 11,4$ M.-% festgestellt. Das am Messpunkt 3 entnommene Bettungsmaterial wies einen Abriebwert von $A_{KM} = 12,8$ M.-% auf. Die Untersuchung des Bettungsmaterials mit dem MMD-Verfahren nach Methode „A“ ergab Werte von 3,8 M.-% (unbelastet) und 3,7 M.-% (belastet).

6.1.2.3 Beispiel N3

Der untersuchte Busbahnhof wurde im Jahr 1988 gebaut. Zehn Buslinien fahren den Bahnhof regelmäßig an, so dass von einer vergleichsweise hohen Verkehrsbelastung auszugehen ist, siehe Bilder 6-48 und 6-49. Die Decke wurde aus Pflastersteinen mit den Maßen 20 cm x 14 cm und einer Dicke von 14 cm im Läuferverband ausgeführt. Nach Auskunft des Tiefbauamtes wurde die Befestigung wie folgt gebaut:

Betonpflaster (20/15)	14 cm
Sandbettung	3 cm
Asphalttragschicht	10 cm
RC-Schotter	23 cm

Auf der gesamten Fläche wurden starke Absackungen und Spurrinnen festgestellt.



Bild 6-48: Ansicht Busbahnhof



Bild 6-49: Pflasterfläche Busbahnhof

Die im Bild 6-50 gezeigte Messung der Ebenheit im Bereich der Fahrspur ergab Spurrinnen mit Tiefen von bis zu etwa 3 cm.



Bild 6-50: Spurrinnen im Bereich der Fahrspur

Zudem wurde der für bestimmte Schäden von Pflasterflächen charakteristische Aus-
trag einer weißen Schlämme festgestellt, die zur Entstehung eines weißen Belages
auf der Pflasteroberseite im Bereich der Absackungen führte.

Bild 6-51 zeigt eindrucksvoll, das sich bei Niederschlag in den Spurrinnen sam-
melnde, weißlich gefärbte Wasser.



Bild 6-51: Stauwasser auf Pflasterfläche

Der erste Messpunkt befand sich im Randbereich des Busbahnhofs außerhalb der
Fahrspur und kann damit als nur gering belastet eingestuft werden. Der zweite
Messpunkt wurde unmittelbar im Bereich der Fahrspur positioniert. Dieser Bereich
wies die oben beschriebenen Schäden in Form von Unebenheiten und Wasserstau auf.

Im Unterschied zum zweiten Messpunkt befand sich der erste Messpunkt unterhalb einer Überdachung und war somit nicht unmittelbar dem Niederschlag ausgesetzt.

- Entnahme der Proben

Messpunkt 1

Im schwach belasteten Bereich des Messpunktes 1 wurde kein sich stauendes Wasser beobachtet; das Bettungsmaterial lag in einem körnigen, unverfestigtem Zustand vor (Bild 6-52). Die in Bild 6-53 gezeigte Messung ergab eine Dicke der Bettung von etwa 4 cm.



Bild 6-52: Oberfläche Bettung am MP1



Bild 6-53: Messung der Bettungsdicke (MP1)

Messpunkt 2

Die Öffnung der Pflasterdecke im belasteten Bereich des Messpunktes 2 (Bild 6-54) ergab, dass die Bettung in einem vollständig durchfeuchteten, schlammartigen Zustand vorlag. Bild 6-55 zeigt das sich in der Bettung stauende Wasser mit gelösten Feinkornanteilen. Die Dicke der Bettung konnte nicht festgestellt werden. In Bild 6-54 ist der auf den Pflastersteinen verbleibende weiße Belag erkennbar.

**Bild 6-54:** Pflasterdecke am MP2**Bild 6-55:** Bettungsschicht am MP2

- Laboruntersuchung

Das Bettungsmaterial setzte sich nach augenscheinlicher Untersuchung aus Kalkstein und einem Rheinsand zusammen. Der Anteil des durch den Salzsäuretest nachgewiesenen Kalksteins betrug etwa 50 % am gesamten Gemisch.

Das Bettungsmaterial im unbelasteten Bereich wies einen Abriebwert von $A_{KM} = 18,3 \text{ M.-%}$ auf; im belasteten Bereich wurde ein geringerer Abriebwert von $A_{KM} = 15,8 \text{ M.-%}$ festgestellt. Die Untersuchung mit dem MMD-Verfahren nach Methode „A“ ergab Abriebwerte von 5,9 M.-% (unbelastet) und 5,7 M.-% (belastet).

6.1.3 Auswertung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen

6.1.3.1 Veränderung der Korngrößenverteilung

Der Vergleich der Korngrößenverteilungen der Bettungsmaterialien im unbelasteten und belasteten Bereich erwies sich nicht als zielführend hinsichtlich der Untersuchung der Feinkornanreicherung bei Beanspruchung der Gesteinskörnungen. Ein Zusammenhang zwischen der Belastung des Materials und der Feinkörnigkeit konnte aus den Korngrößenverteilungen nicht abgeleitet werden, da diese teilweise nur geringfügige Abweichungen aufwiesen oder trotz weitgehend ursprünglichem Zustand deutlich höhere Anteile an Feinkorn aufwiesen.

6.1.3.2 Wasserdurchlässigkeit des Aufbaus

Die an den Flächen P1 bis P4 durchgeführte Bestimmung der Infiltrationsrate sowie der auf der Fläche N3 beobachtete Stau des Wassers zeigen, dass der Grad der Verfestigung des Bettungsmaterials erwartungsgemäß einen Einfluss auf die Durch-

lässigkeit hat. Bei den Flächen mit teilweise oder vollständig verfestigtem Material (P3, P4, N3) wurde eine verminderte Durchlässigkeit festgestellt, während bei den Flächen mit lockerem, ungebundenen Material (P1, P2) der Aufbau weitgehend wasserdurchlässig war. Die Ergebnisse der Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit der schadhaften Straße N1 stehen im Widerspruch zu den bisherigen Erkenntnissen. Trotz der Verfestigung der Bettung wurde eine ausreichende Durchlässigkeit ermittelt, deren Ursache nicht bekannt ist.

6.1.3.3 Abriebwiderstand (Kugelmühlen-Verfahren 0/2)

In Abbildung 6-6 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Abriebwertes A_{KM} mit dem Kugelmühlen-Verfahren nach TP Min-StB an Proben 0/2 mm aus der Bettung vergleichend dargestellt.

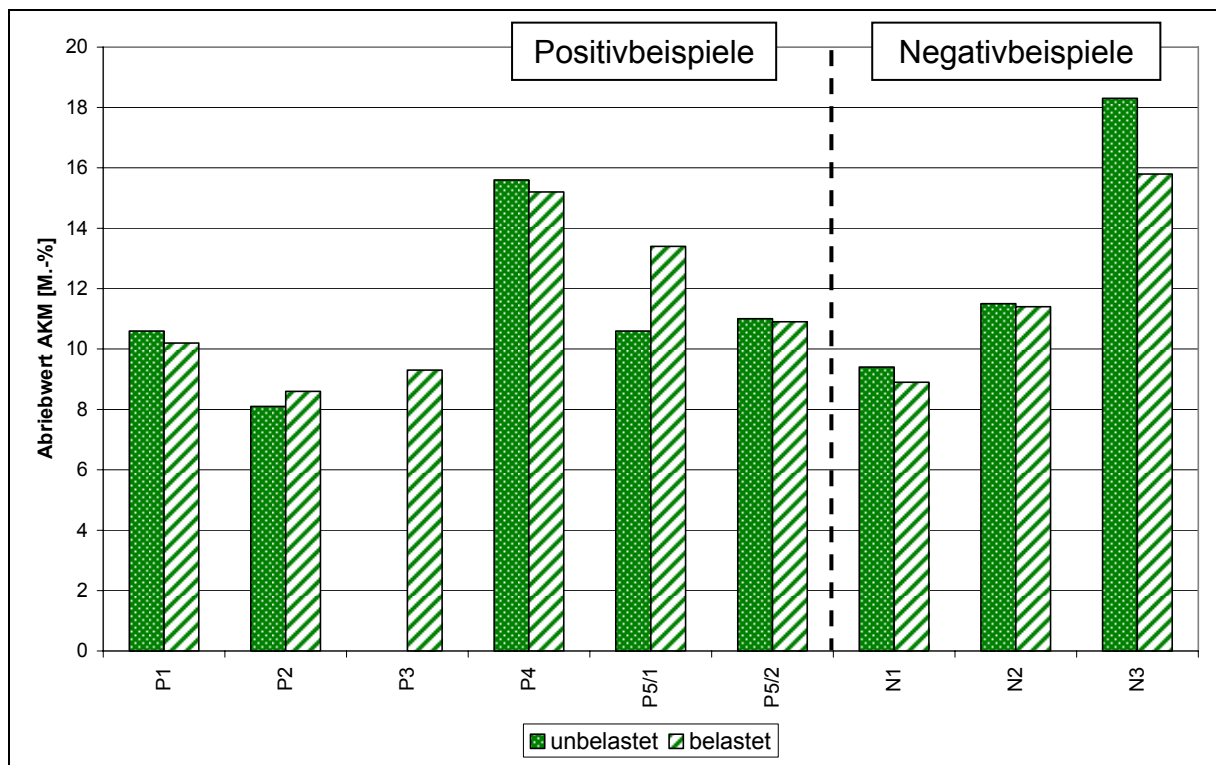


Abbildung 6-6: Ergebnisse des Kugelmühlen-Verfahrens 0/2

Das den belasteten Stellen entnommene Bettungsmaterial weist mehrheitlich eine geringfügig höhere Abriebfestigkeit auf als das Material der schwach belasteten Stellen. Dieser Zusammenhang kann auf die bei Belastung erfolgte Zerkleinerung von Körnern mit geringer Festigkeit zurückgeführt werden. Demnach befindet sich ein geringerer Anteil an für die Zerkleinerung anfälligen Körnern in dem belasteten Gemisch, welches bei der Prüfung eine höhere Festigkeit als das ursprüngliche Material erzielen könnte.

Aus der Gesamtmenge der ermittelten Werte heben sich die Bettungsmaterialien der Flächen P4 und N3 durch eine geringere Festigkeit hervor. Die Pflasterfläche P4 wurde im Bereich der Entnahmestelle als schadfrei eingestuft, wogegen bei der Untersuchung des Busbahnhofes N3 sich im Aufbau stauendes Wasser, der Austrag einer weißen Schlämme und eine deutliche Veränderung des Bettungsmaterials festgestellt wurden. Das Schadensbild der Fläche N3 entspricht den in Kapitel 2 geschilderten üblichen Zeichen bei einem Versagen des Bettungsmaterials. Hieraus wird gefolgert, dass eine zu geringe Abriebfestigkeit des Bettungsmaterials ursächlich für den Schaden der Fläche N3 sein könnte. Als zu gering erwies sich in diesem Fall ein mit dem Kugelmühlen-Verfahren ermittelter Abriebwiderstand von etwa 18 M.-%, der als Anhaltspunkt für die Empfehlung von Anforderungswerten dienen kann.

Besondere Bedeutung kommt der Verwendung von Kalkstein zur Herstellung der Bettung zu. Die im Rahmen der Untersuchungen geprüften Kalksteine 1 und 4 weisen einen Abriebwert im Bereich von $A_{KM} = 19$ bis 20 M.-% auf, der mit den in N3 entnommenen Material nahezu übereinstimmt.

Trotz der für ein Versagen des Bettungsmaterials charakteristischen Merkmale wie die Verfestigung der Bettung und dem Austrag einer weißen Schlämme erwies sich das bei der Fläche N1 verwendete Bettungsmaterial als vergleichsweise abriebbeständig. Nach Aussagen des zuständigen Tiefbauamtes kann der stark bindige und wassergesättigte Untergrund als Ursache für den Schaden in Betracht gezogen werden. Es wird vermutet, dass hier das Bettungsmaterial eine untergeordnete Rolle bei der Entwicklung des Schadens gespielt hat oder dessen Abriebwiderstand durch das sich im Aufbau sammelnde Wasser herabgesetzt wurde und so eine Zermahlung der Körner ermöglicht wurde.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass keine direkte Abhängigkeit der Schäden vom Abriebwert A_{KM} festzustellen ist, da neben den Eigenschaften des Bettungsmaterials vielfältige Einflussfaktoren vorliegen.

6.1.3.4 MMD-Verfahren 0/5

Die bei den Felduntersuchungen entnommenen Bettungsmaterialien wurden mit dem MMD-Verfahren 0/5 untersucht. In Abbildung 6-7 sind die Ergebnisse bei Auswertung nach Methode „A“ dargestellt.

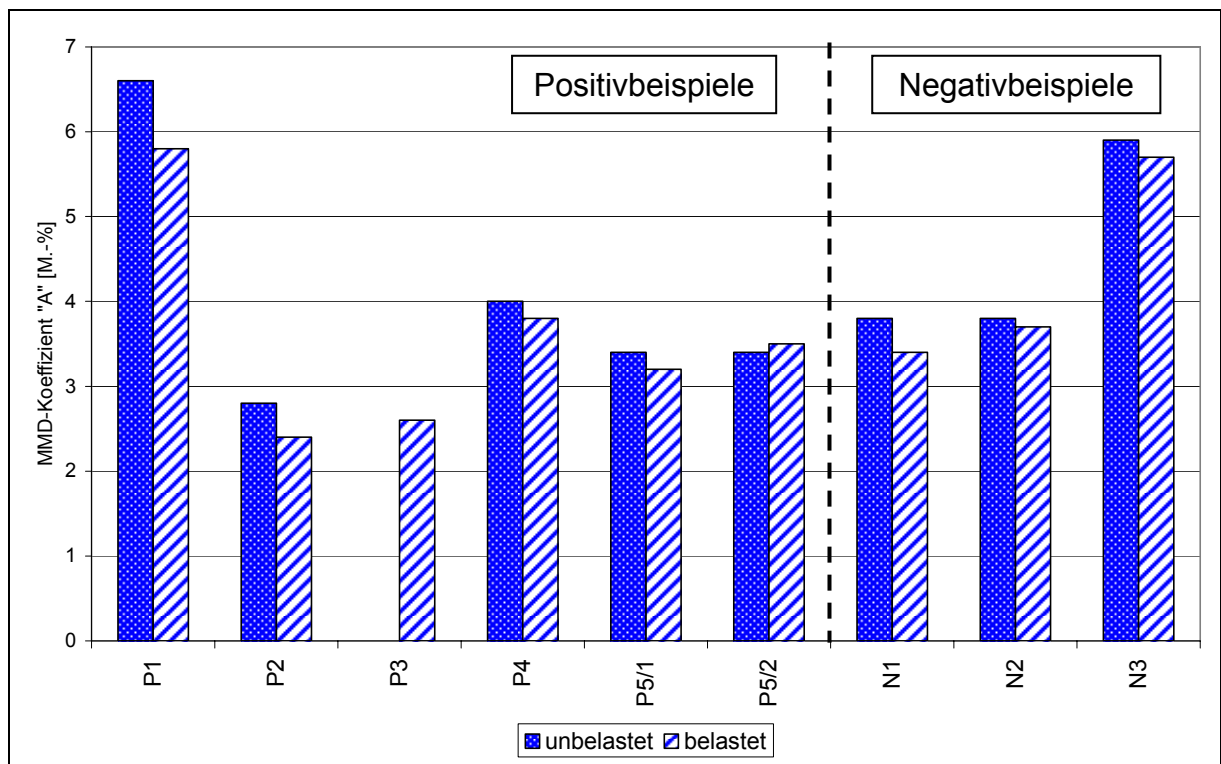


Abbildung 6-7: Ergebnisse des MMD-Verfahrens 0/5 „A“ (0,063 mm)

Die Betrachtung der in Abbildung 6-7 dargestellten Werte zeigt, dass die den Flächen P1 und N3 entnommenen Bettungsmaterialien mit MMD-Koeffizienten > 5 M.-% die insgesamt geringste Abriebbeständigkeit aufweisen. Im Unterschied zum MMD-Verfahren ergab die Untersuchung der Materialien mit dem Kugelmühlen-Verfahren bei Fläche P1 einen Wert im mittleren Bereich (s. Abbildung 6-6). Die unterschiedlichen Beurteilungen der Abriebbeständigkeit können vermutlich auf die verschiedene Art der Gewinnung der Probe zurückgeführt werden: Für das Kugelmühlen-Verfahren wurde das Ausgangsmaterial der Körnung 2/5 mm mechanisch heruntergebrochen; zur Durchführung des MMD-Verfahrens wurden größere Mengen an Unterkorn 0/2 mm aus der Lieferkörnung 2/5 mm ausgesiebt, um die Probe nach den Vorgaben zusammensetzen zu können.

Die Abriebwerte der Flächen N1 und N2 liegen trotz dem Vorhandensein von Schäden unter den Werten des Materials der Fläche N3.

Während bei der Pflasterfläche N3 aus den in Kapitel 6.1.3.3 genannten Gründen angenommen werden kann, dass das Bettungsmaterial für die Entwicklung der Schäden ursächlich ist, können die Schäden der Flächen N1 und N2 auf weitere Ursachen zurückgeführt werden. So kann die Ursache für die Bildung von Spurrinnen bei Fläche N2 neben den Eigenschaften des Bettungsmaterials in der übermäßigen Bettungsdicke oder in der Schottertragschicht aus Kalkstein liegen. Der nach Angabe

des Tiefbauamtes bindige Untergrund bei Fläche N1 kann u. a. zur Entwicklung von Schäden beigetragen haben. Daraus kann gefolgert werden, dass im Gegensatz zu Fläche N3 der Abriebwiderstand des Bettungsmaterials nicht primär ursächlich für die Entstehung von Schäden bei den Flächen N1 und N2 ist.

Der aus den Untersuchungen der 29 Gesteinskörnungen in Kapitel 5 abgeleitete Grenzwert für Bettungsmaterial bei hoch beanspruchten Pflasterflächen von 5 M.-% (MMD „A“) kann angesichts der bei Fläche N3 festgestellten Schäden als plausibel eingestuft werden. Weitere Untersuchungen von Schadensfällen sind jedoch zur Absicherung dieser Aussage erforderlich.

Schwierig gestaltet sich die Beurteilung der geringen Abriebbeständigkeit des Bettungsmaterials der Fläche P1, die trotz längerer Liegezeit und hoher Belastung keine maßgeblichen Schäden aufwies. Es wird vermutet, dass die zur Untersuchung des Ausgangsmaterials ausgesiebten und der Prüfkörnung zugesetzten Anteile < 2 mm über eine geringere Beständigkeit als die Anteile > 2 mm verfügen. Dabei ist anzumerken, dass bei Fläche P1 aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Probenmenge bei dem MMD-Verfahren 0/5 nur eine Einfachbestimmung durchgeführt werden konnte.

6.2 Befragung von Sachverständigen und Tiefbauämtern

6.2.1 Vorgang

Die Befragung von Sachverständigen und Tiefbauämtern wurde vorrangig veranlasst, um den auf den Felduntersuchungen aufbauenden Bewertungshintergrund durch Erfahrungen und Kenntnisse aus dem praktischen Umgang mit Schäden an Pflasterflächen zu vervollständigen. Dazu wurde ein Fragebogen (s. Anhang D) erstellt, der an 55 Tiefbauämter in Nordrhein-Westfalen, mehrheitlich nach vorheriger Absprache, sowie etwa 35 Sachverständige versandt wurde. Der inhaltliche Schwerpunkt der Umfrage bestand in der Sammlung von Erfahrungen mit Schadensfällen aufgrund mangelnden Abriebwiderstandes. Dazu zählten u. a. die Frage nach dem Schadensbild, der Bitte um Nennung von Beispielen für schadhafte Verkehrsflächen sowie der persönlichen Einschätzung der Befragten nach Ursachen und quantitativer Bedeutung des Abriebwiderstandes in Anbetracht der Gesamtheit der Schadensfälle.

19 der an der Umfrage teilnehmenden Tiefbauämter und 4 der Sachverständigen haben eine Antwort zurück gesandt. Davon wurden insgesamt 16 als aussagekräftig für die weitere Auswertung eingestuft. Gründe für den Ausschluss von Antworten waren nach Angaben der Tiefbauämter das Fehlen von systematischen Aufzeichnungen zu Pflasterschäden (66 %) oder fehlende Erfahrungen (17%) mit der geschil-

derden Thematik.

Die Antworten lagen in Form von bearbeiteten Fragebögen vor oder wurden telefonisch erfragt.

Aufgrund der geringen Zahl der erhaltenen Antworten stellen die im Folgenden erläuterten Rückschlüsse Tendenzen dar, die weiterer Absicherung bedürfen.

6.2.2 Ergebnisse der Befragung

Die Auswertung beschränkt sich ausdrücklich auf die Antworten der Tiefbauämter, die Pflasterschäden systematisch untersucht und dokumentiert haben, sowie die der Sachverständigen.

– Mangelnde Wasserdurchlässigkeit

Die mangelnde Wasserdurchlässigkeit der Bettungsschicht wurde mehrheitlich von den Tiefbauämtern im Zusammenhang mit der Entwicklung von Schäden gesehen.

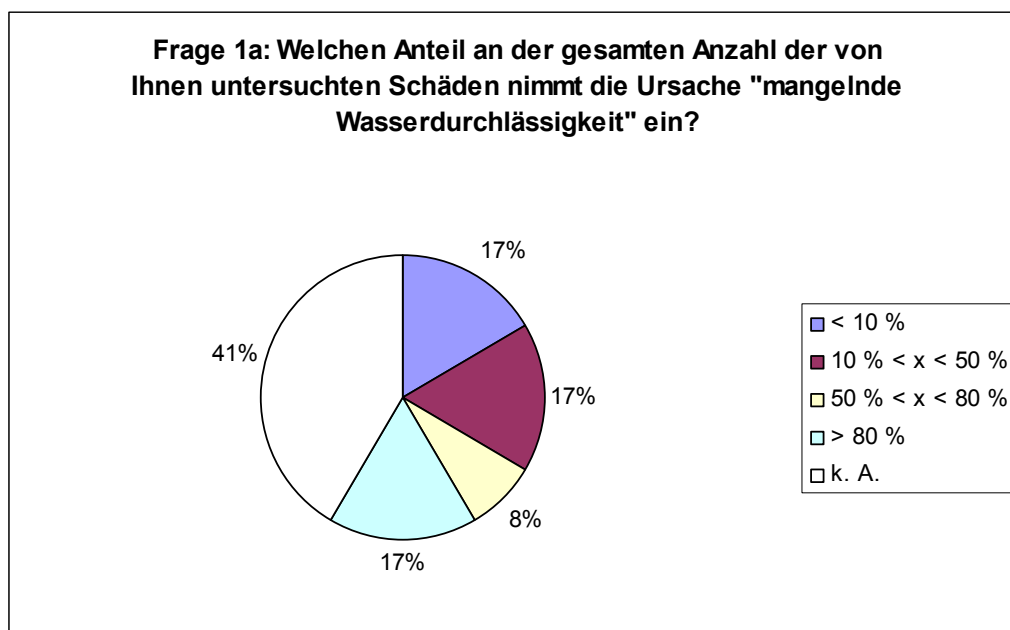


Abbildung 6-8: Frage 1a (Tiefbauämter)

Der Anteil der Ursache „mangelnde Wasserdurchlässigkeit“ bei Pflasterschäden wurde entsprechend Abbildung 6-8 von 17 % der Befragten mit < 10 %, von 41 % zwischen 10 und 50 % und von 17 % mit über 80 % eingeschätzt.

Die Sachverständigen bewerteten die geringe Wasserdurchlässigkeit übereinstimmend als ein Merkmal der meisten Schadensfälle. Sie schätzen, dass der Anteil der Ursache „mangelnden Durchlässigkeit“ mehrheitlich zwischen 50 bis 80 % bei allen Schadensfällen liegt (s. Abbildung 6-9).

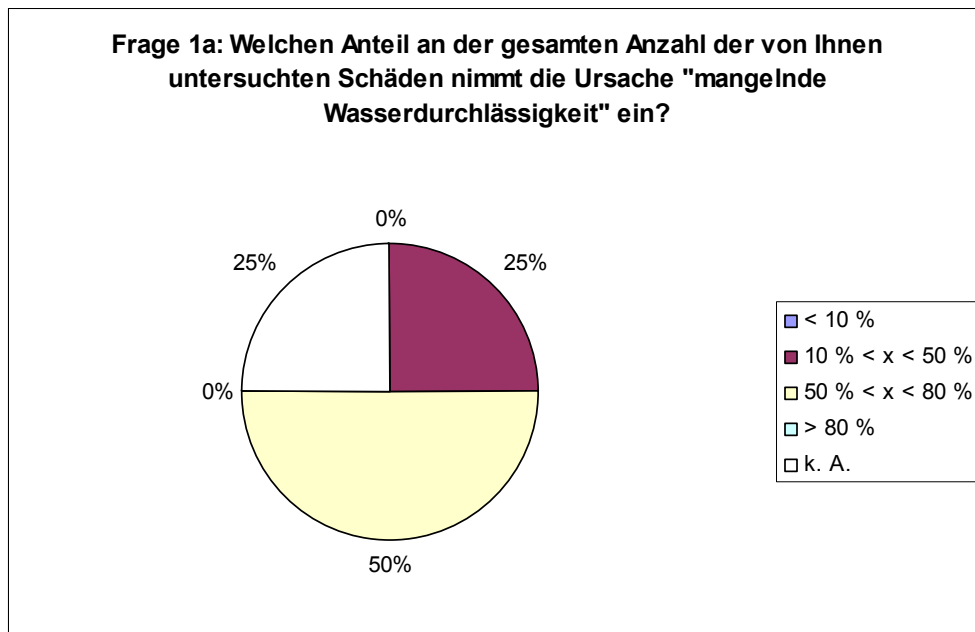


Abbildung 6-9: Frage 1 a (Sachverständige)

– Kornverfeinerung / Abriebwiderstand

58 % der befragten Tiefbauämter sehen in der Kornverfeinerung bzw. dem Abrieb von Bettungs- und Fugenmaterial eine Ursache für die Herabsetzung der Wasserdurchlässigkeit der Bettung und anschließender Schadensbildung (s. Abbildung 6-10). Der Anteil der Schäden an der gesamten Anzahl der untersuchten Schäden wird, wie in Abbildung 6-11 dargestellt, von den Tiefbauämtern mehrheitlich zwischen 10 und 50 % eingeschätzt.

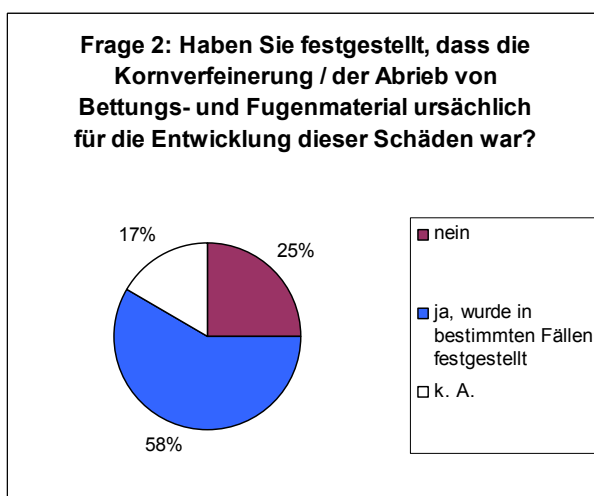


Abb. 6-10: Frage 2 (Tiefbauämter)

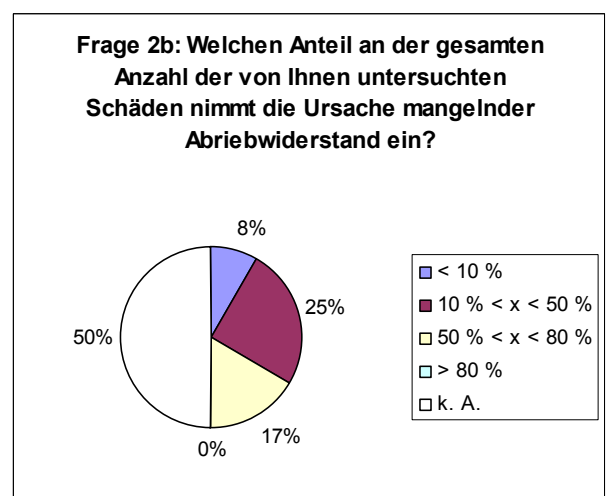


Abb. 6-11: Frage 2b (Tiefbauämter)

Etwa die Hälfte aller untersuchten Schäden können nach Angaben der Sachverständigen auf den mangelnden Abriebwiderstand des Fugen- und Bettungsmaterials zurückgeführt werden. Ein Sachverständiger merkt dazu an, dass insbesondere Schäden mit Kornverfeinerung im Zusammenhang mit dem Einsatz von Kalkstein aufgetreten sind. Den Anteil der auf den mangelnden Abriebwiderstand zurückführbaren Schäden wird überwiegend zwischen 10 bis 50 % eingeschätzt.

Unter den aufgezählten Verkehrsflächen, die einen derartigen Schaden aufwiesen, befanden sich ein Busbahnhof, eine Busspur mit Asphalttragschicht, eine Gehwegüberfahrt und verschiedene Straßen mit regelmäßiger Verkehrsbelastung ohne nähere Beschreibung.

– Schadensbild durch Abrieb und Kornverfeinerung

Das von den Tiefbauämtern mit 50 % am häufigsten genannte Schadensbild im Zusammenhang mit der Ursache „mangelnder Abriebwiderstand“ sind entsprechend Abbildung 6-12 lockere Steine, die bei Befahren klappern und Abplatzungen aufweisen.

Weiterhin wurden festgestellt:

- Kornverfeinerung (8,3 %)
- Transport von Feinanteilen (insgesamt 58,3 %)
- Verfestigung der Bettung (25 %)
- Stehendes Wasser (17 %) und „Pumpeffekt“ (25 %)
- Vorhandensein einer weißen Schlämme / „Verseifen von Material“ (8,3 + 8,3 %)
- Horizontale und vertikale Verformungen der Pflasterdecke (25 %)

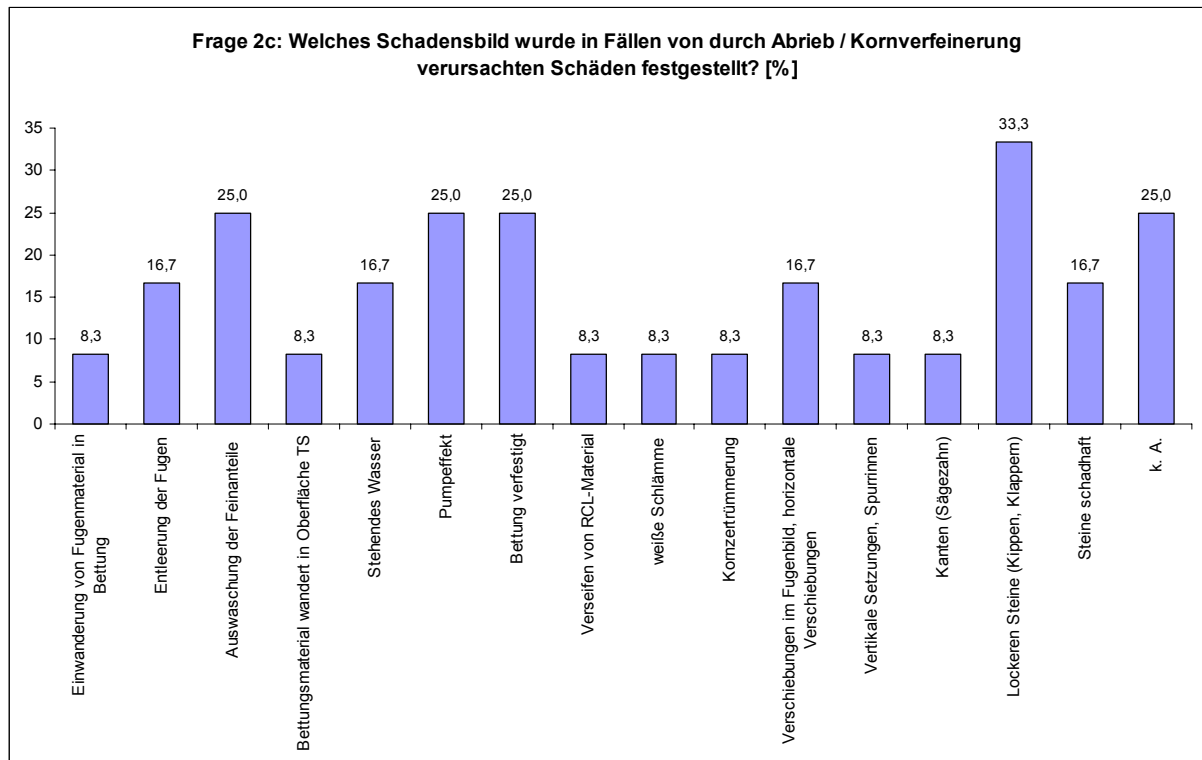


Abbildung 6-12: Frage 2c (Tiefbauämter)

– In welcher Form zeigte sich der Abrieb von Bettungs- und Fugenmaterial?

Die Mehrheit der Tiefbauämter, die sich zum Erscheinungsbild des Abriebs von Bettungs- und Fugenmaterial geäußert haben, bestätigen, dass eine Anreicherung von Feinkorn an der Oberfläche der Bettung bei Untersuchung von Schäden festgestellt wurde (s. Abbildung 6-13). Der überwiegende Teil der Befragten (41 %) sagt aus, dass die Herabsetzung der Wasserdurchlässigkeit im Zusammenhang mit dem mangelnden Abriebwiderstand der verwendeten Materialien steht.

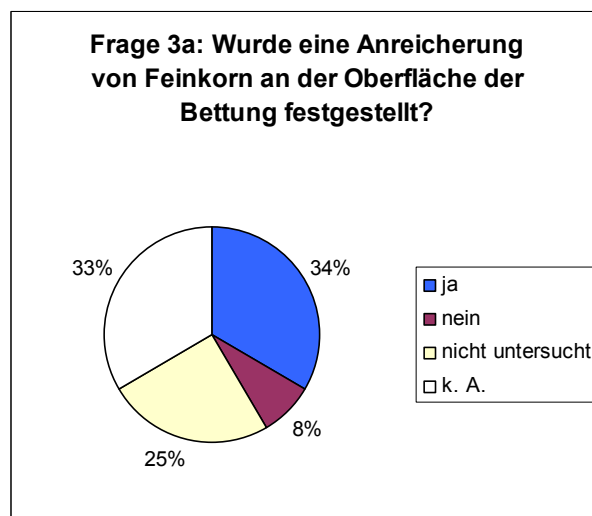


Abb. 6-13: Frage 3a (Tiefbauämter)

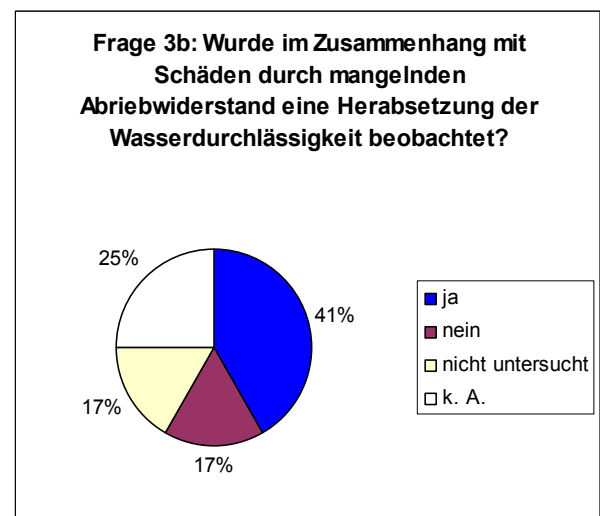


Abb. 6-14: Frage 3b (Tiefbauämter)

Die Frage nach der Anreicherung von Feinkorn auf der Oberfläche der Bettung sowie der Herabsetzung der Wasserdurchlässigkeit wurde von den Sachverständigen mehrheitlich (etwa 75 %) bejaht. Ergänzend wurde aus der Gruppe der Sachverständigen angemerkt, dass diese Schäden vermehrt bei Unterschreitung der minimalen Fugenbreite in Kombination mit einer übermäßig dicken Bettung aufgetreten sind. Zudem seien Verfärbungen oder Muster auf der Oberfläche der Bettung festgestellt worden.

- Bettungsmaterial der geschädigten Flächen

Bei den untersuchten Schäden wurde für die Bettung nach Angabe der Tiefbauämter und Sachverständigen häufig Kalkstein in den Körnungen 0/5 mm und 2/5 mm eingesetzt; in geringeren Anteilen auch Basalte und RC-Baustoffe in verschiedenen Körnungen (s. Abbildung 6-15 und 6-16).

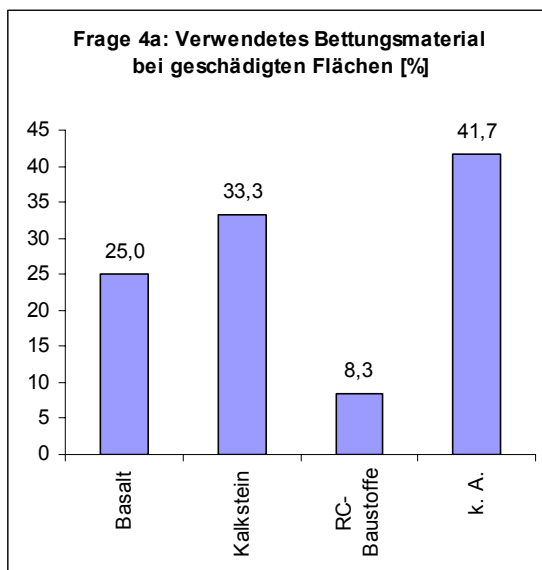


Abb. 6-15: Frage 4a (Tiefbauämter)

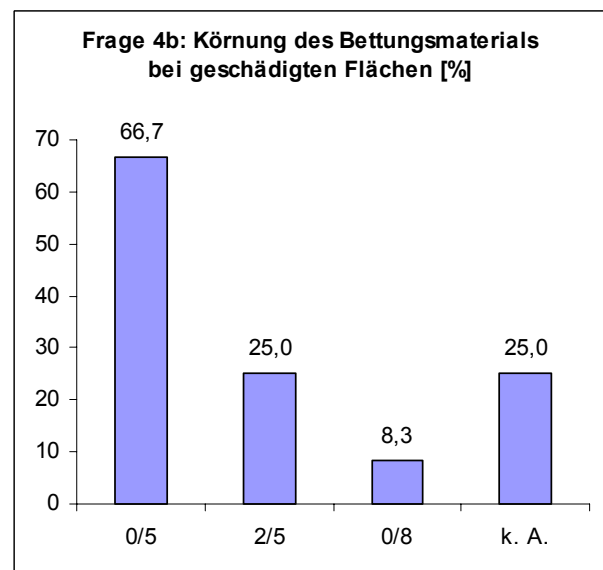


Abb. 6-16: Frage 4b (Tiefbauämter)

- Fugenmaterial der geschädigten Flächen

Für die Fugen der geschädigten Flächen wurden verschiedene Natursande (u. a. Rheinsand) sowie Basalt-Brechsande und RC-Baustoffe verwendet. Das Fugenmaterial wurde überwiegend in den Körnungen 0/2 mm, 0/3 mm, 1/3 mm oder 0/4 mm eingebaut. Die Ergebnisse der Befragung der Tiefbauämter sind in den Abbildungen 6-17 und 6-18 dargestellt.

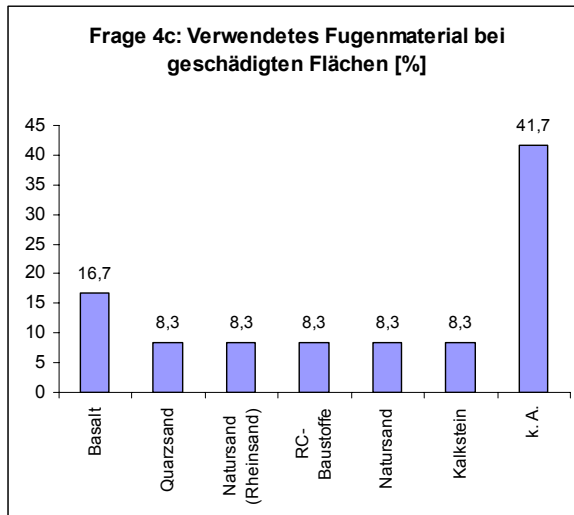


Abb. 6-17: Frage 4c (Tiefbauämter)

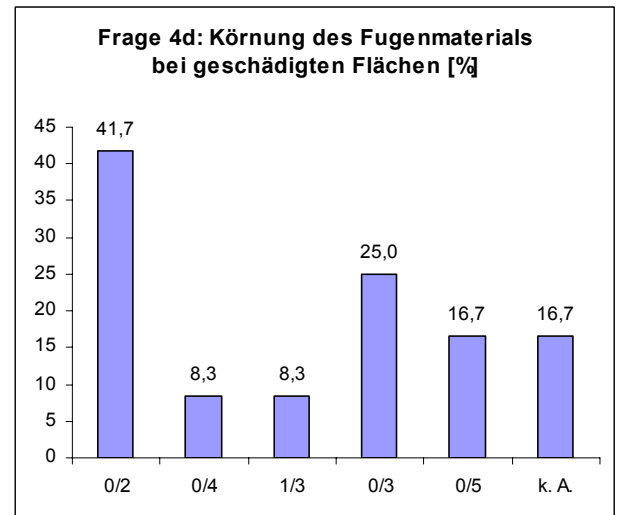


Abb. 6-18: Frage 4d (Tiefbauämter)

- Laboruntersuchungen

Die fünfte Frage bezog sich auf die durchgeführten Laboruntersuchungen zur Schadensuntersuchung. Sie wurde nur selten beantwortet. Die Antworten lassen erkennen, dass die Bestimmung der Korngrößenverteilung häufiger als andere Verfahren angewandt wird. Tendenziell sind Sachverständige und Tiefbauämter der Auffassung, dass eine Veränderung der ursprünglichen Korngrößenverteilung möglich ist.

- Anforderungen an die mechanische Festigkeit

Unter der Frage 6 wurde nach Anforderungen an die mechanische Festigkeit des Bettungs- und Fugenmaterials, die bereits angewandt oder empfohlen würden, gefragt. Die Beantwortung fiel differenziert aus. Mehrmals wurde vorgeschlagen, einen Schlagzertrümmerungswert der Kategorie SZ₂₂ einzuhalten. Andere Befragte sprachen sich für eine stärkere Gewichtung der Wahl der Gesteinsart aus oder maßen den mechanischen Eigenschaften generell keine entscheidende Bedeutung zu. Abbildung 6-19 enthält eine Übersicht über die Beantwortung der Frage 6 von den Tiefbauämtern.

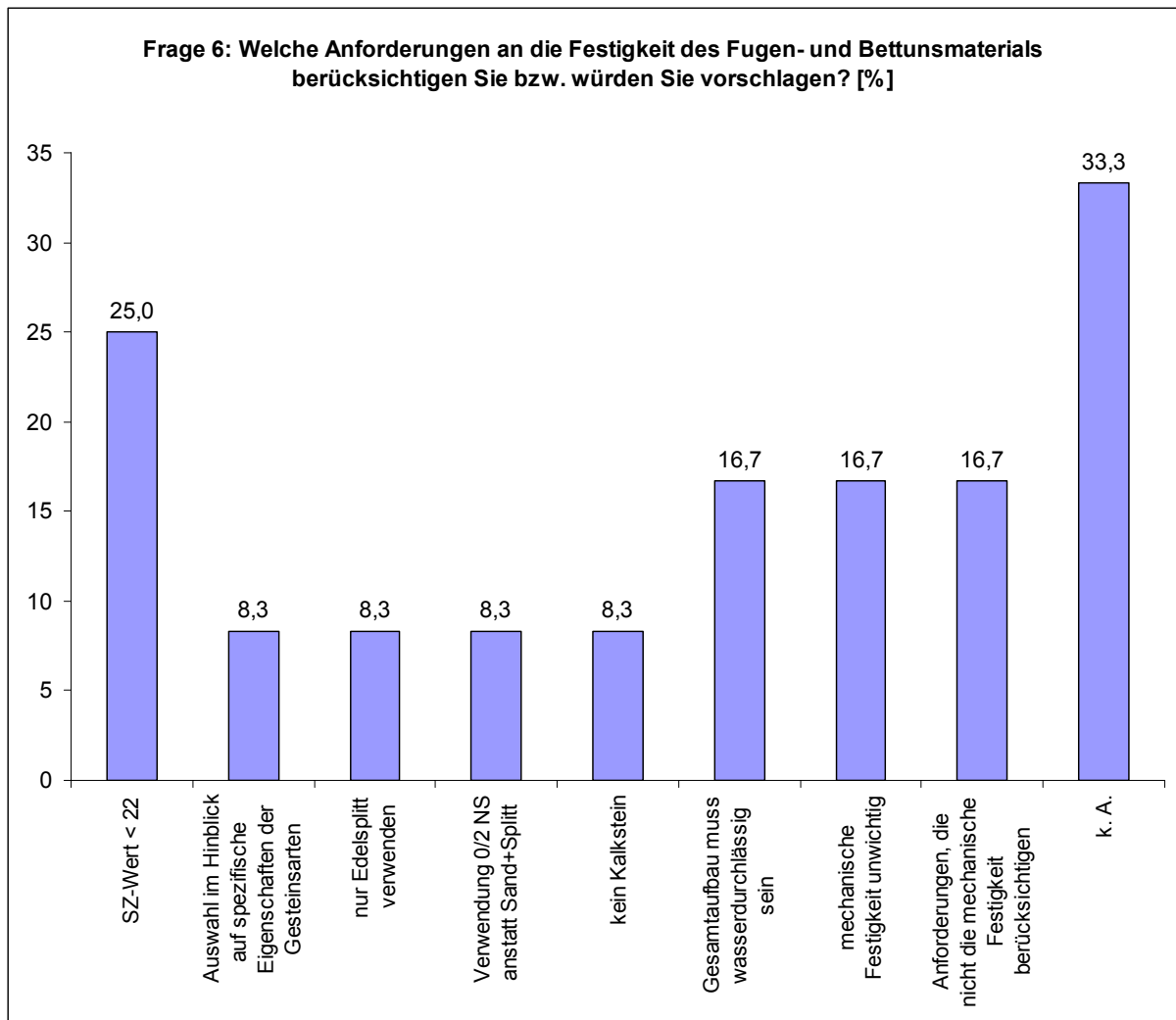


Abbildung 6-19: Frage 6 (Tiefbauämter)

6.2.3 Schlussfolgerungen aus der Befragung

Generell ist auf Grundlage der Auswertung der Umfrage festzustellen, dass Schäden, die auf einem mangelnden Abriebwiderstand des Bettungsmaterials beruhen, in der Praxis als solche erkannt werden und durchaus verbreitet sind.

Der in Kapitel 2.3.7 geschilderte Prozess, der zur Entstehung des Schadens führt, wurde mehrfach von Tiefbauämtern und Sachverständigen bestätigt.

Unklarheit herrscht über die Vermeidung dieser Schäden und die Formulierung von Anforderungen. Der häufig gefundene Verweis auf den Einsatz von Kalkstein im Zusammenhang mit Schäden kann eine Grundlage zur Findung von Anforderungswerten an den MMD-Koeffizienten darstellen. Die vier untersuchten Kalksteine wiesen bis auf Kalkstein 2 vergleichsweise hohe Werte ≥ 5 M.-% auf. Denkbar ist demnach eine Obergrenze für den MMD-Koeffizienten von besagten 5 M.-%.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick

7.1 Schlussfolgerungen für die Praxis

Die Untersuchung von Gesteinskörnungen mit verschiedenen Verfahren hat gezeigt, dass eine sichere Aussage zur Abriebbeständigkeit von feinen Gesteinskörnungen nicht anhand von Prüfungen an groben Gesteinskörnungen getroffen werden kann. Angesichts der auf minderfestes Bettungs- und Fugenmaterial zurückführbaren Schäden an Pflasterbefestigungen besteht somit der Bedarf an einem Verfahren zur Beurteilung der Abriebbeständigkeit der tatsächlich eingesetzten Korngemische.

Das modifizierte Micro-Deval-(MMD-)Verfahren und das Kugelmühlen-Verfahren haben sich als praktikable Verfahren zur Prüfung von feinen Körnungen 0/2 mm und 0/5 mm erwiesen. Dabei zeigte sich die Auswertung des MMD-Verfahrens 0/5 unter Berücksichtigung des Durchganges durch das 0,063-mm-Prüfsieb als vorteilhaft.

Für das MMD-Verfahren spricht vorrangig die Prüfung mit Wasser, die den tatsächlichen Umständen bei der Entstehung eines Schadens in der Pflasterdecke besser entspricht als die Prüfung von getrockneten Proben mit dem Kugelmühlen-Verfahren. Weiterhin begünstigt die weite Verbreitung und Verfügbarkeit des herkömmlichen Micro-Deval-Verfahrens im europäischen und nordamerikanischen Raum das MMD-Verfahren. Dagegen ist das Kugelmühlen-Verfahren zur Prüfung von Straßenbaustoffen eher gering verbreitet. Weiterhin ist das Micro-Deval-Prüfgerät europäisch genormt (DIN EN 1097-1 [3]), die Kugelmühle dagegen nicht.

Nach Ansicht des *ICPI* wird das Micro-Deval-Verfahren für feine Gesteinskörnungen nach [17] zukünftig das vorherrschende Verfahren zur weiterführenden Untersuchung von Bettungs- und Fugenmaterial sein. Aufgrund der Ähnlichkeiten zu dem MMD-Verfahren könnte sich so die Chance bieten, Erfahrungen aus dem europäischen mit dem amerikanischen Raum zu vergleichen.

Im Hinblick auf die Auswahl von Gesteinskörnungen für die Verwendung als Bettungs- und Fugenmaterial von hoch belasteten Pflasterflächen wird bei mit dem MMD-Verfahren geprüften Körnungen 0,25/5,6 mm ein Grenzwert von 5 M.-% Siebdurchgang durch das 0,063-mm-Prüfsieb empfohlen. Mit dieser Anforderung sollten zunächst Erfahrungen gesammelt werden.

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Festlegung von Anforderungswerten für Bettungs- und Fugenmaterialien beruht auf der Untersuchung einer begrenzten Anzahl von Gesteinskörnungen aus Steinbrüchen und Bettungsmaterialien aus Pflasterdecken. Zur Absicherung und Präzisierung der vorgeschlagenen Grenzwerte ist die Untersuchung weiterer Schadensfälle und einwandfreier Pflasterflächen mit langer Liegezeit anzustreben. Wünschenswert

ist die gezielte Einrichtung und Untersuchung von Versuchsstrecken, deren Bettungs- und Fugenmaterialien auf Grundlage der in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse ausgewählt werden könnten. Der damit verbundene große Aufwand scheint gerechtfertigt, da noch nicht geklärt werden konnte, inwieweit die durch das MMD- und Kugelmühlen-Verfahren primär mahlend bzw. reibende Beanspruchung des Materials der tatsächlichen Beanspruchung von Bettungs- und Fugenmaterial im eingebauten Zustand unter statischen und dynamischen Verkehrsbelastungen entspricht. Sollte die Untersuchung weiterer Schadensfälle und Positivbeispiele zeigen, dass zwischen der Abriebfestigkeit von Gesteinskörnungen und der Beständigkeit von Pflasterflächen bei hohen Verkehrslasten und sonst gleichen Randbedingungen ein signifikanter Zusammenhang besteht, kann von einer entsprechenden Belastung der Körner in situ und beim Prüfverfahren ausgegangen werden.

Andernfalls müsste der Einsatz von Prüfverfahren mit anderen Beanspruchungsarten erprobt werden. Das in Kapitel 4.4 vorgestellte modifizierte Proctor-Verfahren würde einen ersten Ansatz dazu darstellen. Die Belastung erfolgt hierbei vorwiegend schlagend, wobei die Last vom gesamten Korngemisch aufgenommen wird. Damit bestünde die Möglichkeit, auch den Einfluss der Korngrößenverteilung gezielt zu ergründen. Trotz einer plausiblen Reihung der untersuchten Materialien nach ihrer Festigkeit, zeigt sich jedoch, dass die Differenzierung weitaus schlechter als bei den Abriebverfahren ausfällt. Die von der Untersuchung feiner Korngemische mit dem SZ-Verfahren bekannten Schwierigkeiten hinsichtlich der durch die Kornverfeinerung mit zunehmender Belastung wachsenden Beständigkeit des Gemisches ist vermutlich auch bei dem hier erprobten Proctor-Verfahren zu erwarten.

Über die Prüfung von grobem Bettungsmaterial der Körnung 0/8 mm oder 0/11 mm mit dem MMD- und Kugelmühlen-Verfahren liegen keine Erkenntnisse vor. Weitere Untersuchungen mit grobem Bettungsmaterial können zeigen, ob ein ausreichender Zusammenhang zu den Ergebnissen der Prüfung der Körnung 0/5 mm besteht.

8 Zusammenfassung

Durch dynamische und statische Verkehrslasten verursachte Reibungskräfte können in einer Pflasterdecke zu einer Verfeinerung des Fugen- und Bettungsmaterials führen. Bei der Verwendung von Gesteinskörnungen mit geringem Abriebwiderstand kann die entsprechend starke Feinkornanreicherung zu einer Entleerung der Fuge und Herabsetzung der Wasserdurchlässigkeit führen, so dass die Entwicklung von Schäden zu erwarten ist. Das Regelwerk empfiehlt daher, Körnungen 0/5 mm oder 0/8 mm mit einem ausreichenden Abriebwiderstand zu verwenden. Nähere Angaben, wie der Abriebwiderstand bestimmt und bewertet werden kann, sind jedoch nicht im Regelwerk enthalten. Anforderungswerte existieren lediglich für grobe Körnungen > 8 mm, obwohl kein gesicherter Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Prüfung verschiedener Körnungen eines Materials besteht.

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Prüfung von Gesteinskörnungen 0/5 mm und 0/2 mm und anschließender Empfehlung von Anforderungswerten. Dazu wurden insgesamt 29 Materialien in Form von Gesteinskörnungen natürlichen Ursprungs, industriellen Nebenprodukten und RC-Baustoffen aus ganz Deutschland anhand ihrer Schlagzertrümmerungswerte ausgewählt und untersucht. Im ersten Arbeitsschritt wurden die Festigkeiten der groben Körnungen 10/14 mm mit dem Micro-Deval-Verfahren nach EN 1097-1 und dem Los Angeles-Verfahren nach EN 1097-2 bestimmt. Für die Untersuchung der feinen Körnungen $< 5,6$ mm waren die Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle nach TP Min-StB sowie ein an die Verschleißprüfung mit dem Micro-Deval-Gerät nach DIN EN 1097-1 angelehntes Verfahren vorgesehen. In Voruntersuchungen wurde das Micro-Deval-Verfahren für die Prüfung von feinen Körnungen 0,25/5,6 mm angepasst. Anhand der Variation der Umdrehungszahl, der Trommelgröße und der Reibladung konnten geeignete Bedingungen für die Bestimmung des Abriebwiderstandes von Gesteinskörnungen gefunden werden. Das Verfahren wird als modifiziertes Micro-Deval-Verfahren (kurz MMD-Verfahren) bezeichnet. Anschließend wurden Abriebprüfungen an 29 repräsentativen Gesteinskörnungen durchgeführt. Ziel war die Bestimmung eines Kennwertes für feine Gesteinskörnungen.

Die Proben wurden nach einer bestimmten Vorgabe zusammengesetzt und unter Zugabe von Wasser und einer aus Stahlkugeln bestehenden Reibladung während 1500 Umdrehungen in der Trommel vorwiegend reibend beansprucht. Das Ausmaß der erfolgten Kornverfeinerung konnte durch den Vergleich der Korngrößenverteilungen vor und nach Beanspruchung anhand verschiedener Methoden ermittelt werden. Als vorteilhaft erwies sich die Berechnung des MMD-Koeffizienten anhand des Anteils $< 0,063$ mm nach Beanspruchung, welcher auf die Gesamtmasse der Probe

bezogen wird.

Die so ermittelten Ergebnisse erlaubten eine gute Unterscheidung zwischen abriebbeständigen und weichen Gesteinskörnungen. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Gesteinsart und der Abriebbeständigkeit wurde nicht festgestellt. Industrielle Nebenprodukte wie Schmelzkammergranulat und LD-Schlacke wiesen eine hohe Abriebbeständigkeit auf, während der geprüfte rezyklierte Ziegel zu den Gesteinskörnungen mit geringer Abriebfestigkeit zählt. Die Streuung des aus sechs Einzelwerten ermittelten MMD-Koeffizienten (0,063 mm) kann angesichts der Standardabweichung von durchschnittlich 0,34 M.-% als gering beurteilt werden.

In einem weiteren Schritt wurde die Durchführung des MMD-Verfahrens an Proben der Körnung 0/2 mm erprobt. Bei Anpassung der Umdrehungszahl eignet sich das MMD-Verfahren auch zur Prüfung der Abriebbeständigkeit von feinem Fugenmaterial.

Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren mittels Berechnung der (linearen) Korrelationskoeffizienten ergab, dass die Wahl der Prüfkörnung, die Art der Beanspruchung sowie die Form der Auswertung einen Einfluss auf die Festigkeit haben. Dabei zeigte sich, dass die mit dem MMD-Verfahren an Gesteinskörnungen 0/5 ermittelten Ergebnisse keinen direkten Zusammenhang zu den Ergebnissen des Micro-Deval-, des Schlagzertrümmerungs- und des Los Angeles-Verfahrens aufweisen. Die zu Beginn des Vorhabens geäußerte These, dass die an groben Gesteinskörnungen ermittelte Festigkeit nicht auf die üblicherweise für Bettungs- und Fugenmaterialien verwendeten Körnungen übertragen werden kann, wurde damit bestätigt. Das Kugelmühlen-Verfahren entsprach hinsichtlich der Beanspruchung der Proben weitgehend dem MMD-Verfahren. Die Anpassung der Auswertung und Variation der verwendeten Prüfkörnung führte zu einem signifikantem Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Kugelmühlen- und des MMD-Verfahrens.

Zur Findung von Anforderungswerten wurde ein Bewertungshintergrund mittels Felduntersuchungen und der Befragung von Sachverständigen und Tiefbauämtern erarbeitet. Von acht hoch belasteten Verkehrsflächen in der Pflasterbauweise wurde der Zustand erfasst und Daten zum Aufbau und den verwendeten Materialien gesammelt. Dabei wurden sowohl Positivbeispiele mit langer Liegezeit und gutem Zustand als auch Negativbeispiele in Form von Schadensfällen untersucht. An den vor Ort entnommenen Bettungsmaterialien wurde die Abriebfestigkeit mit dem MMD- und dem Kugelmühlen-Verfahren bestimmt. Die Laboruntersuchungen deuten auf eine erhöhte Schadensanfälligkeit der Flächen bei Verwendung eines Bettungsmaterials mit einem MMD-Koeffizienten > 5 M.-%. In jedem Fall sind weitere Untersuchungen zur Absicherung der festgestellten Tendenzen erforderlich.

Die Befragung der Sachverständigen und Tiefbauämter zeigte, dass die fehlende Abriebfestigkeit von Fugen- und Bettungsmaterial als Ursache von Schäden an Pflasterflächen bekannt ist und in der Praxis festgestellt wurde. Bestimmte Gesteinskörnungen stehen nach Ansicht der Sachverständigen in Zusammenhang mit der vermehrten Entwicklung von Schäden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf die Absicherung der Ergebnisse sowie der Erweiterung des Anwendungsbereichs des MMD-Verfahrens auf Bettungsmaterialien der Körnungen 0/8 mm und 0/11 mm.

9 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1097-2: Prüfverfahren für physikalische und chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1998
- [2] Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau TP Min Teil 5.4.2: Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle, Ausgabe 1982, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [3] DIN EN 1097-1: Prüfverfahren für physikalische und chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß (Micro-Deval); Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 200
- [4] Norme Francaise P 18-576: Mesure du coefficient de friabilité des sables; association francaise de normalisation; Paris, 1990
- [5] Trommsdorf, V.: Grundzüge der geologischen Wissenschaften, 4. Auflage, Verlag der Fachvereine Zürich, Zürich 1991
- [6] Schindler, C.: Einführung in Geologie und Petrographie, Verlag der Fachvereine Zürich, 2. Auflage, Zürich 1990
- [7] Maresch, W; Medenbach, O.: Steinbachs Naturführer, Mosaik Verlag GmbH, München 1987
- [8] Schumann, W.: Der neue BLV Steine und Mineralienführer, 4. Auflage, BLV Verlagsgesellschaft, München 1994
- [9] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau - TL Gestein-StB 04, Ausgabe 2004, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [10] Wieden, P.; Kappel, F.: Untersuchungen an Gesteinsmaterialien hinsichtlich Abriebverhalten und Widerstandsfähigkeit gegen Polieren, Bundesministerium für Bauten und Technik, Heft 2; Wien, 1973
- [11] Woodside, A. R.; Woodward, W. D.: Durability of surface aggregate - The Implications of CEN Test Methods on current British Specification Requirements; Performance and Durability of bituminous materials / Proc. of Symposium, University of Leeds, 1994
- [12] Augustin, H.; Eppensteiner, W.: Verschleißversuche an Straßenbaugesteinen nach EN 1097-1, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Heft 494; Wien, 1999
- [13] Grabow, K.: Untersuchung der Einflussfaktoren des Micro-Deval-Prüfverfahrens an Sanden, Diplomarbeit Fachhochschule Köln (unveröffentlicht), 2005
- [14] Barge, U.: Technische, ökologische und ökonomische Kriterien für die Wahl von Gesteinskörnungen zum Bau und zur Erhaltung von ungebundenen Deckschichten im Waldwegebau; Dissertation; Göttingen, 2000

- [15] Beaty, A. N. S.: Laying Course Materials: Specification and Performance, Proc. Fifth International Conference on Concrete Block Paving, Tel Aviv 1996
- [16] ICPI Tech Spec Number 17, Interlocking Concrete Pavement Institute, Washington, D.C., USA, 2007
- [17] CSA A23.2 -23A, The Resistance of Fine Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval-Apparatus, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2004
- [18] Wu, Y.; Parker, F.: Aggregate toughness /abrasion resistance and durability / soundness / tests related to asphalt concrete performance in pavements; Transportation Research Record 1638; Washington D. C., 1998
- [19] ASTM C 131-81: Normprüfverfahren zur Bestimmung des Zerkleinerungswiderstandes von feinkörnigen Mineralstoffen durch Abrieb und Schlag in der Los Angeles-Trommel, American Society for Testing and Materials.
- [20] ÖNORM B 3128: Prüfung von Naturstein und von anorganischen Baustoffen - Prüfung von Körnungen in der Los Angeles-Trommel, Österreichisches Normeninstitut 1986.
- [21] Fenz, G.; Gregori, H.: Los Angeles-Wert und Kornform - Auswirkung der Einführung europäischer Normen, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 464; Wien, 1996
- [22] Lilley, A. A.; Dowson, A. J.: Laying Course Sand for Concrete Block Paving, Proc. Third International Conference on Concrete Block Paving, Rome 1988
- [23] ICPI Tech Spec Number 15, Interlocking Concrete Pavement Institute, Washington DC USA 2003
- [24] BS 812: Methods of Testing of Mineral Aggregates, Sands and fillers, British Standards Institution, 1951
- [25] American Society for Testing and Materials Standard D2-1968
- [26] Ballmann, P.: Vergleichende Untersuchung zwischen Los Angeles-Prüfverfahren und Schlagversuch; veröffentlicht in: Die Naturstein-Industrie 6/1996
- [27] Henningsen, D.; Maass, U.-W.: Beziehungen zwischen Festigkeitsverhalten und petrografischer Zusammensetzung - Korneigenschaften von nieder-sächsischen Sanden; veröffentlicht in: Die Naturstein-Industrie 5/1986
- [28] Vergleichsuntersuchungen an Schweizer Mineralstoffen für den Straßenbau im Hinblick auf europäische Normen (Mandat de recherche 22/92), Bundesamt für Straßenbau, Heft 321, Bern 1994
- [29] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen – RStO 01, Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln

-
- [30] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen, ZTV Pflaster-StB 2006, Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
 - [31] Beaty, A. N. S.: Predicting the Performance of Bedding Sands, Proc. Fourth International Conference on Concrete Block Paving, Auckland, 1992
 - [32] Koch, C.: Zum Tragverhalten von Pflasterbefestigungen, Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 13, Bochum 1999
 - [33] Shackel, B.: "The performance of interlocking pavements under accelerated trafficking", Proc first Int Conf on Concrete Block Paving. London, Conc Publishing Co. 1980
 - [34] Shackel, B.: The Challenges of Concrete Block Paving as a Mature Technology, Proc. 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City 2003
 - [35] Beaty, A. N. S.: Bedding Sands for Concrete Block Pavements Subject to Heavy Channelised Loading, Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo 1994
 - [36] Beaty, A. N. S.: Durability of Bedding Sands for Interlocking Concrete Block Pavements; n. b.
 - [37] Cook, I. D.; Knapton, J.: Bedding Course Sands, Proc. Fourth International Conference on Concrete Block Paving, Auckland 1992
 - [38] Knapton, J.: The Nature and Classification of Bedding Sand, Proc. 1993 BIBM, 14th International Congress of the Precast Concrete Industry, Washington DC, 1993
 - [39] Yaginuma, H.; Kasahara, A.: Load Transfer Efficiency in Interlocking Block Pavements with Joint and Bedding Sand, Proc. 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco 2006
 - [40] Dowson, A. J.: The Effects of Sand Quality on the Structural Performance of Concrete Block Paving, Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo 1994
 - [41] Dowson, A. J.: The Influence and Effects of Water in Laying Course Material in Concrete Block Paving Construction, JIPEA World Congress 2000
 - [42] Knapton, J.: Paver Laying Course Materials: State of the Art, Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo 1994
 - [43] Dowson, A. J.: Bedding Sand Durability, Proc. 1993 BIBM, International Congress of the Precast Concrete Industry, Washington DC 1993
 - [44] Dowson, A. J.: Further Investigation into Saturated Bedding Sand - Interim Report, Proc. Fifth International Conference on Concrete Block Paving, Tel Aviv 1996

-
- [45] Kurth, N.: Beurteilung und Bewährung verschiedener Fugen- und Bettungsmaterialien, n. b.
 - [46] Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen, Teil 1 Regelbauweise (ungebundene Ausführung) – M FP 1, Ausgabe 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
 - [47] Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen - TL Pflaster-StB 06, Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
 - [48] Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau RG Min-StB, Ausgabe 2000, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
 - [49] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für physikalische und chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2001
 - [50] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißern, Ausgabe 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
 - [51] DIN EN 933-6: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2002
 - [52] Vogler, H.: Vergleichende Trocken- und Nassprüfung der Festigkeit von Gesteinskörnungen - Setzungs- und Kugelmühlenversuche -; veröffentlicht in: Die Naturstein Industrie 7/1988
 - [53] DIN EN 13286-2: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt - Proctorversuch; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2004
 - [54] DIN 18130: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit; Ausgabe 1998, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht über die verschiedenen Verfahren	18
Tabelle 3-1:	Auswahl der Gesteinskörnungen.....	31
Tabelle 3-2:	Rohdichte der untersuchten Materialien in Abhängigkeit von den Körnungen.....	33
Tabelle 3-3:	Ausflussdauer vor und nach Beanspruchung durch das MMD 0/2-Verfahren	46
Tabelle 4-1:	Zusammensetzung der Probe für die Prüfung mit dem MMD-Verfahren.....	52
Tabelle 4-2:	Standardabweichung der Siebdurchgänge aus 6 Werten je Analysesieb beim MMD-Verfahren	56
Tabelle 4-3:	Veränderung der Zusammensetzung der Probe durch Abriebbeanspruchung.....	59
Tabelle 4-4:	Verschiedene Varianten der Auswertung des MMD-Verfahrens	62
Tabelle 4-5:	Reihung der Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Methode der Auswertung	66
Tabelle 4-6:	MMD 0/2, 500 Umdrehungen	68
Tabelle 4-7:	MMD 0/2, 1500 Umdrehungen	68
Tabelle 4-8:	Ergebnisse der Untersuchung Kugelmühle an Proben 0,25/5,6 mm	71
Tabelle 4-9:	Ergebnisse des modifizierten Proctor-Verfahrens 0,25/5,6	72
Tabelle 5-1:	Einteilung der untersuchten Gesteine in Gruppen.....	74
Tabelle 5-2:	Korrelationsmatrix (MMD 0/5 A bis L).....	75
Tabelle 5-3:	Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. SZ, LA und MD-Verfahren	76
Tabelle 5-4:	Korrelationsmatrix SZ, Kugelmühle (AKM), LA und MD	76
Tabelle 5-5:	Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/2 (TP Min-StB)	77
Tabelle 5-6:	Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/2 (Modifiziert)	81
Tabelle 5-7:	Korrelationsmatrix MMD 0/2 (500 U) vs. Kugelmühle 0/2 AKM, A bis C.....	86
Tabelle 5-8:	Korrelationsmatrix MMD 0/5 vs. Kugelmühle 0/5.....	89
Tabelle 5-9:	Korrelationsmatrix mod. Fließkoeffizient vs. ausgewählte Verfahren	92
Tabelle 5-10:	Beurteilung der Gesteinskörnungen	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Prinzipskizze Schlagprüfgerät.....	7
Abbildung 2-2:	Micro-Deval Gerät nach DIN EN 1097-1 (Schema)	8
Abbildung 2-3:	Bauweise mit Pflasterdecke nach ZTV Pflaster-StB	19
Abbildung 2-4:	Prinzip der Kraftübertragung zwischen Pflasterstein, Fuge und Bettung	21
Abbildung 3-1:	Micro-Deval-Koeffizienten, Prüfkörnung 10/14 mm	35
Abbildung 3-2:	Reihung der Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Micro- Deval-Koeffizienten.....	36
Abbildung 3-3:	Los Angeles-Koeffizienten, Prüfkörnung 10/14 mm	37
Abbildung 3-4:	Reihung der Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Los Angeles-Koeffizienten	38
Abbildung 3-5:	Schlagzertrümmerungswerte 8/12 mm	39
Abbildung 3-6:	Reihung der Gesteine nach aufsteigendem SZ-Wert	40
Abbildung 3-7:	Ergebnisse der Bestimmung des Abriebwertes AKM mit dem Kugelmühlen-Verfahren 0/2	42
Abbildung 3-8:	Reihung der Gesteinskörnungen nach aufsteigendem Abrieb- wert.....	43
Abbildung 3-9:	Modifizierte Fließkoeffizient vor und nach Prallprüfung an Sand 0/2 mm	45
Abbildung 4-1:	Darstellung der untersuchten Varianten der Korngrößen- verteilungen der Proben.....	48
Abbildung 4-2:	Darstellung der Korngrößenverteilungen nach Abriebbean- spruchung mit und ohne Feinanteil 0/0,25 mm bei Kalkstein.....	48
Abbildung 4-3:	Darstellung der Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Umdrehungszahlen (EN Trommel, NF P Beladung)	49
Abbildung 4-4:	Darstellung der Korngrößenverteilungen bei unterschiedlichen Trommelgrößen (Kalkstein, 1500 Umdrehungen) vor und nach Beanspruchung.....	51
Abbildung 4-5:	Skizze zum Aufbau des MMD-Verfahrens	54
Abbildung 4-6:	Korngrößenverteilungen aller Materialien im Vergleich (MMD 0/5).....	57
Abbildung 4-7:	Korngrößenverteilung des Basalts 11 vor und nach Bean- spruchung	58
Abbildung 4-8:	Korngrößenverteilung des Quarzits 17 vor und nach Bean- spruchung	58

Abbildung 4-9:	Anteile der Kornklassen [M.-%] vor Beanspruchung (Beispiel Kalkstein 1)	60
Abbildung 4-10:	Anteile der Kornklassen [M.-%] nach Beanspruchung (Beispiel Kalkstein 1)	60
Abbildung 4-11:	Auswertung MMD 0/5 nach Methode „A“ (Prüfsieb: 0,063 mm)....	63
Abbildung 4-12:	Auswertung MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „E“ (Prüfsieb: 0,71 mm)	64
Abbildung 4-13:	Auswertung MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „H“ (alle Prüfsiebe)	65
Abbildung 4-14:	Auswertung MMD-Verfahren 0/5 nach Methode „J“ (3 Prüfsiebe)	65
Abbildung 4-15:	Korngrößenverteilung vor und nach Beanspruchung beim modifizierten Proctor-Verfahren	72
Abbildung 5-1:	Kugelmühle 0/2 vs. MMD 0/5 „A“	78
Abbildung 5-2:	Kugelmühle 0/2 vs. MMD 0/5 „H“	79
Abbildung 5-3:	Kugelmühle 0/2 vs. MMD 0/5 „J“	80
Abbildung 5-4:	Kugelmühle „A“ (0,09 mm) vs. MMD „B“ (0,125 mm).....	82
Abbildung 5-5:	AKM 0/2 „B“ (0,25 mm) vs. MMD 0/5 „C“ (0,25 mm).....	83
Abbildung 5-6:	AKM 0/2 „C“ (0,71 mm) vs. MMD 0/5 „E“ (0,71 mm).....	84
Abbildung 5-7:	KGv vor und nach Beanspruchung für MMD 0/2 nach 500 U und nach 1500 U, Kugelmühle 0/2 nach Beanspruchung für Kalkstein 3	85
Abbildung 5-8:	MMD 0/2 AKM(MMD) (500 U).....	86
Abbildung 5-9:	Kugelmühle 0/2 AKM	86
Abbildung 5-10:	Kugelmühle 0/2 (AKM) und MMD 0-2 (AKM) (500 U)	87
Abbildung 5-11:	Vergleich MMD 0/5 und Kugelmühle 0/5 (Kalkstein 1).....	88
Abbildung 5-12:	MMD 0/5 „A“ (0,063 mm)	89
Abbildung 5-13:	Kugelmühle 0/5 „A“ (0,063 mm).....	89
Abbildung 5-14:	MMD 0/5 „A“ vs. Kugelmühle 0/5 „A“	90
Abbildung 5-15:	MMD 0/5 „D“ vs. Rohdichte 2/5 mm.....	91
Abbildung 5-16:	Obergrenze für den MMD-Koeffizienten bei besonders hohen Verkehrslasten (Bettungsmaterial).....	96
Abbildung 5-17:	Obergrenze für den Abriebwert AKM bei besonders hohen Verkehrslasten (Fugenmaterial).....	96
Abbildung 6-1:	Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials im unbelasteten Bereich (schwarz) und im belasteten Bereich (rot)	102
Abbildung 6-2:	Korngrößenverteilungen der Bettung im belasteten und unbelasteten Bereich	105
Abbildung 6-3:	Korngrößenverteilung des belasteten Bettungsmaterials	108

Abbildung 6-4:	Korngrößenverteilung des belasteten (rot) und unbelasteten (schwarz) Bettungsmaterials.....	111
Abbildung 6-5:	Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials	119
Abbildung 6-6:	Ergebnisse des Kugelmühlen-Verfahrens 0/2.....	128
Abbildung 6-7:	Ergebnisse des MMD-Verfahrens 0/5 „A“ (0,063 mm).....	130
Abbildung 6-8:	Frage 1a (Tiefbauämter).....	132
Abbildung 6-9:	Frage 1 a (Sachverständige)	133
Abbildung. 6-10:	Frage 2 (Tiefbauämter).....	133
Abbildung 6-11:	Frage 2b (Tiefbauämter).....	133
Abbildung 6-12:	Frage 2c (Tiefbauämter)	135
Abbildung 6-13:	Frage 3a (Tiefbauämter).....	135
Abbildung. 6-14:	Frage 3b (Tiefbauämter).....	135
Abbildung 6-15:	Frage 4a (Tiefbauämter).....	136
Abbildung 6-16:	Frage 4b (Tiefbauämter).....	136
Abbildung 6-17:	Frage 4c (Tiefbauämter)	137
Abbildung. 6-18:	Frage 4d (Tiefbauämter).....	137
Abbildung 6-19:	Frage 6 (Tiefbauämter).....	138

Bildverzeichnis

Bild 2-1:	Reibladung nach NF P 18-576, Teil 2.....	10
Bild 2-2:	Los Angeles-Trommel	12
Bild 2-3:	Kugelmühle	14
Bild 2-4:	Reibladung und Trommel	14
Bild 2-5:	Dowson-Lilley-Verfahren (<i>Bottle rolling test</i>)	15
Bild 3-1:	Proben (0,09/2 mm) vor (links) und nach (links) Beanspruchung in der Kugelmühle.....	41
Bild 4-1:	Trommel nach DIN EN 1097-1	53
Bild 4-2:	Reibladung aus Stahlkugeln.....	53
Bild 4-3:	Apparatur zur Rotation der Trommeln	53
Bild 4-4:	Gneis 18 (Korngröße 2 bis 5 mm) vor und nach Beanspruchung.....	55
Bild 4-5:	GW 7 nach 500 U	67
Bild 4-6:	GW 7 nach 1500 U	67
Bild 4-7:	Kalkstein1 vor Beanspruchung	70
Bild 4-8:	Kalkstein 1 nach Beanspruchung	70
Bild 4-9:	Rhyolith 14 vor Beanspruchung	70
Bild 4-10:	Rhyolit 14 nach Beanspruchung.....	70
Bild 6-1:	Ansicht.....	100
Bild 6-2:	Busverkehr	100
Bild 6-3:	Einrichtung MP1	100
Bild 6-4:	Einrichtung MP2	100
Bild 6-5:	Verband der Fläche P1.....	101
Bild 6-6:	Bettung MP1.....	101
Bild 6-7:	Bettung MP2.....	101
Bild 6-8:	Ansicht MP1	103
Bild 6-9:	Entnahme von Proben (MP1)	103
Bild 6-10:	Ansicht MP2.....	104
Bild 6-11:	Entnahme von Proben (MP2).....	104
Bild 6-12:	Oberfläche der Bettung im belasteten Bereich.....	104
Bild 6-13:	Untersuchung der Straße.....	106
Bild 6-14:	Haltestelle für Taxen	106
Bild 6-15:	Bettungsschicht mit Muster	107
Bild 6-16:	Ansicht der Fläche	109
Bild 6-17:	Verbundsteine und Verband	109
Bild 6-18:	Ansicht MP1	109

Bild 6-19:	Ansicht MP2.....	109
Bild 6-20:	Bettung im unbelasteten Bereich	110
Bild 6-21:	Ansicht P 5.....	112
Bild 6-22:	Naturstein Oberseite	112
Bild 6-23:	Steinunterseite	112
Bild 6-24:	Messpunkt 1.....	113
Bild 6-25:	Messung der Ebenheit am Messpunkt 2.....	113
Bild 6-26:	Lichtsignalanlage im Bereich der Messpunkte 3 und 4	114
Bild 6-27:	Lage der Messpunkte 3 und 4.....	114
Bild 6-28:	Öffnung Pflasterdecke	115
Bild 6-29:	Oberfläche der Bettung am MP 1.....	115
Bild 6-30:	Ebenheit der Pflasterdecke am MP 3 und MP 4	116
Bild 6-31:	Sanierung der Pflasterfläche.....	117
Bild 6-32:	Ansicht Spurrinne.....	118
Bild 6-33:	Austrag Schlämme.....	118
Bild 6-34:	Ansicht der Fläche N2.....	120
Bild 6-35:	Verbundpflasterstein	120
Bild 6-36:	Ansicht MP1 (schwach belastet).....	120
Bild 6-37:	Ansicht MP2 (belastet).....	120
Bild 6-38:	Ansicht MP3.....	121
Bild 6-39:	Busverkehr MP3	121
Bild 6-40:	Setzungen (MP2).....	121
Bild 6-41:	Fugentleerung (MP3).....	121
Bild 6-42:	Oberfläche Bettung MP1.....	122
Bild 6-43:	Bettung MP1	122
Bild 6-44:	Oberfläche Bettung MP2.....	123
Bild 6-45:	Bestimmung der Dicke der Bettung (MP2).....	123
Bild 6-46:	Oberfläche Bettung MP3.....	123
Bild 6-47:	Messung der Bettung MP3	123
Bild 6-48:	Ansicht Busbahnhof	124
Bild 6-49:	Pflasterfläche Busbahnhof	124
Bild 6-50:	Spurrinnen im Bereich der Fahrspur	125
Bild 6-51:	Stauwasser auf Pflasterfläche.....	125
Bild 6-52:	Oberfläche Bettung am MP1.....	126
Bild 6-53:	Messung der Bettungsdicke (MP1).....	126
Bild 6-54:	Pflasterdecke am MP2.....	127
Bild 6-55:	Bettungsschicht am MP2	127

Ergebnisse des Modifizierten Micro-Deval-Verfahrens

Kalkstein 1

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	34.3	18.8	11.8	2.9	1.4	2.0	7.4	15.6	4.5	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	34.3	53.1	64.9	67.7	69.2	71.2	78.6	94.2	98.7	99.6
	Rückstand	[M.-%]	34.1	18.6	11.8	2.9	1.4	2.0	7.4	15.5	4.6	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	34.1	52.7	64.5	67.4	68.8	70.8	78.2	93.7	98.3	99.7
	Rückstand	[M.-%]	34.8	18.6	11.6	3.0	1.5	2.0	7.5	15.2	4.5	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	34.8	53.4	65.0	68.0	69.5	71.4	78.9	94.1	98.6	99.7
	Rückstand	[M.-%]	34.9	19.3	11.2	2.8	1.4	1.9	7.3	15.6	4.1	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	34.9	54.1	65.3	68.2	69.6	71.6	78.8	94.4	98.5	99.8
	Rückstand	[M.-%]	34.8	18.8	10.9	2.8	1.5	2.0	7.4	15.8	4.5	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	34.8	53.6	64.5	67.4	68.8	70.8	78.2	94.0	98.6	99.6
	Rückstand	[M.-%]	35.1	19.1	10.6	2.9	1.5	2.1	7.3	15.0	4.6	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	35.1	54.2	64.8	67.7	69.2	71.2	78.5	93.5	98.1	99.6
Ø	Durchgang	[M.-%]	0.0	34.7	53.5	64.8	67.7	69.2	71.2	78.6	94.0	98.5	99.7
	σ	[M.-%]	-	0.357	0.587	0.319	0.323	0.335	0.300	0.292	0.335	0.224	0.076

Kalkstein 2

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	19.8	11.4	14.1	8.0	3.5	4.1	10.6	20.9	6.4	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	19.8	31.2	45.3	53.4	56.9	61.0	71.6	92.5	98.9	99.9
	Rückstand	[M.-%]	19.2	11.5	14.2	8.2	3.7	4.0	10.1	21.7	6.1	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	19.2	30.7	44.9	53.2	56.9	60.9	71.0	92.7	98.8	100.0
	Rückstand	[M.-%]	19.0	11.4	14.5	8.1	3.6	4.1	10.1	22.1	5.6	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	19.0	30.4	44.9	53.0	56.6	60.7	70.8	92.8	98.4	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.5	11.1	14.6	8.4	3.6	4.1	10.0	20.9	6.7	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	19.5	30.6	45.1	53.5	57.1	61.2	71.2	92.1	98.8	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.0	11.1	14.4	8.3	3.7	4.3	10.8	20.7	6.5	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	19.0	30.2	44.5	52.8	56.5	60.8	71.6	92.3	98.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	19.3	11.2	14.3	8.3	3.8	4.1	10.4	21.0	6.6	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	19.3	30.5	44.8	53.1	56.8	60.9	71.3	92.3	98.9	99.8
Ø	Durchgang	[M.-%]	19.3	30.6	44.9	53.2	56.8	60.9	71.2	92.4	98.8	99.9	19.3
	σ	[M.-%]	-	0.294	0.347	0.277	0.253	0.227	0.192	0.325	0.287	0.168	0.062

Kalkstein 3

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	25.5	11.8	11.7	6.5	2.9	3.5	9.6	21.3	5.8	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	25.5	37.3	49.0	55.5	58.4	61.9	71.6	92.9	98.7	99.9
	Rückstand	[M.-%]	24.7	12.0	12.2	6.7	3.1	3.6	9.1	21.4	5.5	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	24.7	36.7	48.9	55.7	58.7	62.3	71.4	92.9	98.4	100.0
	Rückstand	[M.-%]	25.6	11.8	11.6	6.6	3.1	3.4	9.2	21.6	5.8	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	25.6	37.4	49.0	55.5	58.6	62.1	71.3	92.8	98.7	99.9
	Rückstand	[M.-%]	24.7	11.8	11.9	6.8	3.1	3.6	8.9	22.3	5.0	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	24.7	36.6	48.5	55.3	58.4	62.0	70.9	93.2	98.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	24.5	11.6	12.2	6.7	3.1	3.5	9.2	22.1	5.7	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	24.5	36.1	48.3	55.0	58.1	61.6	70.8	92.9	98.6	99.9
	Rückstand	[M.-%]	24.6	11.5	12.0	6.7	3.0	3.6	9.6	21.7	6.0	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	24.6	36.0	48.0	54.7	57.8	61.3	70.9	92.7	98.6	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	24.9	36.7	48.6	55.3	58.3	61.9	71.1	92.9	98.5	99.9	24.9
	σ	[M.-%]	-	0.482	0.575	0.402	0.365	0.362	0.364	0.319	0.173	0.206	0.096

Kalkstein 4

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	31.4	15.5	12.8	4.5	2.1	2.5	9.3	16.2	4.6	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	31.4	46.8	59.7	64.2	66.3	68.8	78.0	94.3	98.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	31.4	15.6	12.4	4.4	2.0	2.5	8.9	17.2	4.5	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	31.4	47.0	59.4	63.8	65.9	68.3	77.2	94.4	98.9	99.8
	Rückstand	[M.-%]	30.9	15.4	12.9	4.6	2.1	2.7	9.7	15.8	4.9	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	30.9	46.2	59.2	63.8	65.9	68.6	78.3	94.1	99.0	99.8
	Rückstand	[M.-%]	30.8	15.0	13.5	4.6	2.0	2.7	9.1	16.3	5.2	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	30.8	45.8	59.3	63.9	65.9	68.6	77.7	94.0	99.2	99.9
	Rückstand	[M.-%]	31.8	15.0	12.0	4.1	1.9	2.4	9.0	16.8	5.0	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	31.8	46.8	58.8	62.9	64.8	67.3	76.3	93.1	98.2	99.1
	Rückstand	[M.-%]	32.4	15.3	12.2	4.3	2.0	2.6	9.4	15.5	5.0	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]	0.0	32.4	47.7	59.9	64.3	66.2	68.9	78.3	93.8	98.8	99.5
Ø	Durchgang	[M.-%]	31.4	46.7	59.4	63.8	65.8	68.4	77.6	94.0	98.8	99.7	31.4
	σ	[M.-%]	-	0.603	0.657	0.395	0.476	0.520	0.582	0.773	0.455	0.348	0.322

Grauwacke 5

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	36.3	14.2	7.1	2.7	1.7	2.3	8.5	20.5	5.5	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.3	50.5	57.7	60.3	62.1	64.4	72.9	93.4	99.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	36.4	14.3	6.9	2.6	1.6	2.4	8.4	19.5	6.4	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.4	50.7	57.6	60.2	61.8	64.2	72.7	92.2	98.5	99.8
	Rückstand	[M.-%]	35.6	14.9	7.6	2.8	1.6	2.4	8.6	19.3	5.8	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.6	50.5	58.1	60.9	62.5	64.8	73.4	92.7	98.6	99.8
	Rückstand	[M.-%]	35.6	14.4	7.1	2.7	1.7	2.4	8.5	20.6	5.2	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.6	50.0	57.1	59.8	61.5	63.8	72.4	93.0	98.2	99.6
	Rückstand	[M.-%]	35.2	14.8	7.6	2.8	1.7	2.4	8.7	19.6	5.4	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.2	50.0	57.6	60.4	62.2	64.6	73.3	92.8	98.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	35.3	14.5	7.2	2.6	1.6	2.3	8.5	20.4	5.3	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.3	49.8	57.0	59.6	61.2	63.5	72.0	92.3	97.7	99.4
Ø	Durchgang	[M.-%]	35.7	50.3	57.5	60.2	61.9	64.2	72.8	92.7	98.4	99.7	35.7
	σ	[M.-%]	-	0.522	0.629	0.574	0.613	0.629	0.642	0.795	0.422	0.384	0.144

Grauwacke 6

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	19.8	11.6	13.7	6.9	2.9	3.5	9.6	24.5	5.9	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.8	31.4	45.1	51.9	54.8	58.3	67.8	92.4	98.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.9	11.6	13.8	6.6	2.9	3.4	9.6	24.8	6.0	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.9	31.5	45.3	51.9	54.8	58.2	67.8	92.6	98.6	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.9	11.5	14.0	6.6	2.8	3.4	9.7	24.9	5.9	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.9	31.4	45.4	52.0	54.8	58.3	67.9	92.8	98.7	99.9
	Rückstand	[M.-%]	19.8	11.5	13.6	6.7	2.8	3.5	10.1	25.0	5.8	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.8	31.4	44.9	51.6	54.4	57.9	67.9	93.0	98.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	19.7	11.6	13.7	6.6	2.8	3.4	10.2	24.6	5.8	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.7	31.4	45.0	51.7	54.5	57.8	68.1	92.7	98.5	100.0
	Rückstand	[M.-%]	19.6	11.5	13.8	6.8	2.8	3.4	10.0	24.7	5.9	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.6	31.1	45.0	51.7	54.5	57.9	67.8	92.5	98.4	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	19.8	31.4	45.1	51.8	54.6	58.1	67.9	92.6	98.5	99.9	19.8
	σ	[M.-%]	-	0.122	0.119	0.182	0.163	0.197	0.216	0.104	0.215	0.190	0.101

Grauwacke 7

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	34.6	16.3	8.2	2.6	1.6	2.4	8.8	18.4	5.8	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		34.6	50.9	59.1	61.7	63.3	65.7	74.4	92.9	98.7	100.0
	Rückstand	[M.-%]	35.0	16.0	7.9	2.6	1.8	2.2	9.1	18.4	5.7	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.0	50.9	58.9	61.5	63.3	65.5	74.6	93.0	98.7	100.0
	Rückstand	[M.-%]	34.6	16.0	8.1	2.6	1.6	2.4	8.4	19.4	5.6	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		34.6	50.6	58.8	61.4	63.0	65.4	73.8	93.2	98.8	99.8
	Rückstand	[M.-%]	35.4	16.7	6.8	2.5	1.5	2.2	8.0	19.3	6.1	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.4	52.1	58.9	61.4	62.9	65.2	73.2	92.5	98.6	99.9
	Rückstand	[M.-%]	35.0	16.0	7.8	2.6	1.7	2.4	9.0	18.2	6.0	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.0	51.0	58.8	61.4	63.1	65.5	74.5	92.7	98.7	99.6
	Rückstand	[M.-%]	35.6	15.3	8.0	2.5	1.5	2.3	8.6	18.8	6.0	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		35.6	50.9	58.9	61.4	63.0	65.3	73.9	92.7	98.7	99.8
Ø	Durchgang	[M.-%]	35.0	51.1	58.9	61.5	63.1	65.4	74.1	92.8	98.7	99.8	35.0
	σ	[M.-%]	-	0.412	0.510	0.113	0.110	0.155	0.169	0.535	0.257	0.077	0.125

Diabas 8

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	17.7	10.0	13.9	8.7	3.4	3.7	10.7	23.2	7.0	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.7	27.7	41.6	50.3	53.7	57.4	68.1	91.4	98.4	99.9
	Rückstand	[M.-%]	18.0	9.9	13.7	8.7	3.3	3.8	10.5	23.4	6.6	2.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.0	27.9	41.7	50.4	53.6	57.4	67.9	91.3	97.9	100.0
	Rückstand	[M.-%]	18.1	10.3	13.4	8.5	3.2	3.6	10.4	23.5	7.0	1.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.1	28.3	41.7	50.3	53.5	57.1	67.5	91.0	98.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	18.2	10.1	14.0	8.5	3.3	3.6	10.4	23.3	6.6	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.2	28.4	42.4	50.9	54.1	57.8	68.2	91.6	98.2	99.9
	Rückstand	[M.-%]	18.2	10.5	13.7	8.3	3.1	3.8	10.5	23.3	6.5	1.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.2	28.7	42.5	50.8	53.9	57.7	68.2	91.5	98.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.9	10.4	14.0	8.5	3.4	3.7	10.1	23.5	6.7	1.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.9	28.3	42.3	50.8	54.2	57.9	67.9	91.4	98.1	99.9
Ø	Durchgang	[M.-%]	18.0	28.2	42.0	50.6	53.8	57.5	68.0	91.3	98.1	99.9	18.0
	σ	[M.-%]	-	0.196	0.361	0.406	0.281	0.288	0.307	0.289	0.201	0.175	0.042

Diabas 9

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	22.8	11.2	14.0	8.0	3.4	3.5	11.4	18.8	5.8	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.8	34.0	48.0	56.1	59.4	63.0	74.4	93.2	99.1	100.0
	Rückstand	[M.-%]	22.3	11.0	13.7	8.1	3.3	3.6	13.4	18.4	5.4	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.3	33.3	47.0	55.1	58.4	62.0	75.4	93.8	99.2	100.0
	Rückstand	[M.-%]	22.5	11.1	13.8	8.0	3.3	3.5	12.1	19.2	5.7	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.5	33.6	47.4	55.5	58.8	62.3	74.4	93.6	99.3	100.0
	Rückstand	[M.-%]	22.9	11.4	13.8	8.2	3.4	3.7	11.5	19.0	5.3	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.9	34.3	48.0	56.3	59.7	63.3	74.8	93.8	99.2	100.0
	Rückstand	[M.-%]	22.2	11.0	13.7	8.1	3.4	3.5	12.2	19.2	5.6	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.2	33.2	46.9	55.0	58.4	61.9	74.1	93.3	98.9	100.0
	Rückstand	[M.-%]	22.0	11.2	13.6	8.0	3.3	3.5	11.8	19.7	5.8	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.0	33.2	46.8	54.8	58.1	61.6	73.4	93.1	99.0	99.9
Ø	Durchgang	[M.-%]	22.4	33.6	47.4	55.5	58.8	62.3	74.4	93.5	99.1	100.0	22.4
	σ	[M.-%]	-	0.361	0.464	0.561	0.605	0.633	0.670	0.648	0.295	0.146	0.063

Basalt 10

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	23.7	13.8	13.8	6.3	2.7	3.1	9.8	19.7	5.5	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.7	37.5	51.3	57.6	60.2	63.3	73.1	92.8	98.3	99.6
	Rückstand	[M.-%]	23.9	13.9	13.9	6.2	2.6	3.2	10.2	18.7	5.8	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.9	37.8	51.7	57.8	60.5	63.7	73.9	92.6	98.4	99.6
	Rückstand	[M.-%]	23.5	14.0	14.7	6.3	2.8	3.1	10.4	17.9	5.9	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.5	37.5	52.2	58.5	61.3	64.4	74.8	92.6	98.5	99.7
	Rückstand	[M.-%]	24.0	13.7	14.0	6.2	2.8	3.2	10.1	18.5	5.9	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		24.0	37.7	51.7	57.9	60.7	63.9	74.0	92.5	98.4	99.6
	Rückstand	[M.-%]	24.2	13.6	13.9	6.3	2.7	3.1	9.8	18.6	6.3	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		24.2	37.8	51.6	58.0	60.7	63.8	73.6	92.2	98.5	99.7
	Rückstand	[M.-%]	24.1	13.9	14.0	6.3	2.9	3.1	10.0	18.4	5.7	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		24.1	38.0	52.0	58.3	61.2	64.3	74.3	92.7	98.5	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	23.9	37.7	51.7	58.0	60.8	63.9	74.0	92.6	98.4	99.7	23.9
	σ	[M.-%]	-	0.247	0.185	0.311	0.333	0.410	0.399	0.563	0.212	0.075	0.057

Basalt 11

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	17.3	8.5	11.2	10.5	4.4	4.9	11.2	23.5	6.4	2.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.3	25.8	36.9	47.4	51.8	56.7	67.9	91.3	97.7	99.8
	Rückstand	[M.-%]	16.8	8.7	11.3	10.5	4.6	5.0	10.9	24.3	5.6	2.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.8	25.5	36.8	47.3	51.9	57.0	67.9	92.2	97.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	18.9	9.1	11.6	9.0	4.3	4.4	11.4	23.6	6.0	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.9	28.0	39.5	48.6	52.9	57.3	68.8	92.4	98.4	100.1
	Rückstand	[M.-%]	17.4	9.0	12.0	9.3	4.4	4.9	11.2	23.9	6.2	1.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.4	26.3	38.3	47.6	52.0	56.9	68.1	92.0	98.2	100.1
	Rückstand	[M.-%]	16.3	8.8	11.2	10.5	4.5	4.9	11.3	24.1	6.5	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.3	25.0	36.2	46.7	51.2	56.1	67.4	91.5	98.0	99.8
	Rückstand	[M.-%]	16.5	8.6	11.5	10.6	4.4	5.1	10.8	23.9	6.6	1.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.5	25.1	36.6	47.2	51.6	56.7	67.5	91.4	98.0	99.9
Ø	Durchgang	[M.-%]	17.2	26.0	37.4	47.5	51.9	56.8	67.9	91.8	98.0	99.9	17.2
	σ	[M.-%]	-	0.928	1.085	1.250	0.615	0.567	0.411	0.489	0.428	0.235	0.126

Granit 12

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	18.7	16.3	23.5	8.4	2.1	2.3	6.8	15.0	5.2	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.7	35.1	58.5	66.9	69.0	71.3	78.1	93.1	98.3	99.8
	Rückstand	[M.-%]	18.7	16.8	23.5	8.6	2.2	2.2	7.0	14.6	4.9	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.7	35.5	59.0	67.6	69.8	72.0	79.0	93.6	98.5	99.7
	Rückstand	[M.-%]	18.8	17.1	23.2	8.5	2.1	2.4	7.5	14.0	4.8	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.8	35.9	59.1	67.5	69.6	72.1	79.6	93.6	98.3	99.6
	Rückstand	[M.-%]	18.9	17.3	23.0	8.4	2.1	2.4	7.3	14.4	4.8	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.9	36.2	59.2	67.6	69.7	72.1	79.4	93.8	98.6	99.7
	Rückstand	[M.-%]	18.8	16.9	23.2	8.1	2.1	2.2	7.1	14.8	5.0	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.8	35.7	58.9	67.0	69.1	71.3	78.4	93.3	98.3	99.6
	Rückstand	[M.-%]	18.6	16.9	24.0	8.7	2.3	2.4	7.5	13.8	4.3	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.6	35.5	59.5	68.1	70.4	72.8	80.3	94.1	98.4	99.5
Ø	Durchgang	[M.-%]	18.7	35.6	59.0	67.5	69.6	71.9	79.2	93.6	98.4	99.7	18.7
	σ	[M.-%]	-	0.089	0.393	0.318	0.447	0.503	0.571	0.787	0.341	0.140	0.102

Granit 13

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	16.9	16.9	25.9	11.0	2.4	2.1	6.4	13.6	4.0	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.9	33.8	59.7	70.6	73.0	75.1	81.4	95.0	99.0	99.8
	Rückstand	[M.-%]	16.9	17.0	25.3	10.6	2.2	2.1	6.2	13.9	4.3	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.9	34.0	59.3	69.9	72.2	74.2	80.5	94.4	98.7	100.0
	Rückstand	[M.-%]	17.1	17.0	25.6	10.6	2.1	2.1	5.9	14.1	4.4	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.1	34.1	59.7	70.3	72.4	74.5	80.4	94.5	98.9	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.1	17.3	25.8	10.7	2.3	2.0	6.1	13.4	4.4	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.1	34.4	60.3	71.0	73.2	75.2	81.3	94.7	99.1	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.1	16.5	26.0	10.7	2.1	2.1	6.2	14.0	4.5	0.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.1	33.6	59.6	70.2	72.4	74.4	80.6	94.7	99.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	17.0	16.7	25.6	10.7	2.1	2.0	6.1	14.2	4.1	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.0	33.7	59.4	70.1	72.2	74.2	80.3	94.5	98.6	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	17.0	33.9	59.6	70.4	72.6	74.6	80.8	94.6	98.9	99.8	17.0
	σ	[M.-%]	-	0.101	0.315	0.343	0.376	0.441	0.435	0.490	0.219	0.230	0.106

Rhyolith 14

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	14.2	8.0	14.0	11.5	4.5	4.6	11.9	22.4	7.4	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		14.2	22.2	36.2	47.6	52.2	56.7	68.7	91.1	98.5	100.0
	Rückstand	[M.-%]	13.7	8.0	14.3	11.5	4.4	4.6	11.8	23.4	6.7	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		13.7	21.7	35.9	47.5	51.9	56.5	68.3	91.6	98.3	100.0
	Rückstand	[M.-%]	14.1	8.1	14.1	11.4	4.4	4.7	11.6	23.0	7.0	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		14.1	22.1	36.2	47.6	52.1	56.7	68.3	91.4	98.4	100.0
	Rückstand	[M.-%]	13.8	7.9	14.3	11.6	4.4	4.5	12.6	22.4	6.5	1.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		13.8	21.7	36.0	47.6	52.0	56.6	69.1	91.5	98.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	14.2	8.0	14.4	11.4	4.4	4.7	12.0	23.0	6.6	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		14.2	22.2	36.5	48.0	52.3	57.0	69.0	91.9	98.5	100.0
	Rückstand	[M.-%]	14.2	8.2	14.3	11.6	4.3	4.6	11.7	23.1	6.0	1.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		14.2	22.4	36.7	48.3	52.6	57.3	69.0	92.1	98.1	100.0
Ø	Durchgang	[M.-%]	14.0	22.0	36.3	47.8	52.2	56.8	68.7	91.6	98.3	100.0	14.0
	σ	[M.-%]	-	0.217	0.289	0.295	0.300	0.265	0.285	0.360	0.366	0.204	0.039

Rhyolith 15

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	32.5	18.2	13.1	3.3	1.3	1.6	7.0	16.9	4.9	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		32.5	50.8	63.9	67.2	68.5	70.1	77.1	94.0	99.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	31.9	18.3	13.1	3.1	1.2	1.7	6.6	18.4	4.7	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		31.9	50.2	63.3	66.4	67.6	69.3	75.9	94.3	99.0	100.0
	Rückstand	[M.-%]	32.3	18.7	12.2	2.9	1.2	1.8	7.0	18.2	4.9	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		32.3	51.1	63.3	66.2	67.5	69.3	76.2	94.4	99.3	99.8
	Rückstand	[M.-%]	31.6	18.5	12.9	3.2	1.4	1.8	7.2	17.7	4.9	0.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		31.6	50.1	62.9	66.1	67.5	69.3	76.5	94.2	99.1	99.7
	Rückstand	[M.-%]	32.6	18.3	12.4	3.0	1.4	1.5	6.6	17.8	5.3	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		32.6	50.9	63.4	66.3	67.7	69.2	75.8	93.6	98.9	99.8
	Rückstand	[M.-%]	31.8	18.8	12.8	3.1	1.3	1.7	6.9	17.7	5.1	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		31.8	50.6	63.4	66.5	67.8	69.5	76.4	94.1	99.2	100.0
Ø	Durchgang	[M.-%]	32.1	50.6	63.3	66.4	67.7	69.4	76.3	94.1	99.1	99.8	32.1
	σ	[M.-%]	-	0.425	0.400	0.301	0.376	0.382	0.350	0.482	0.271	0.140	0.124

Quarzit 16

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	21.9	21.5	18.0	2.7	1.1	1.7	7.3	18.5	5.8	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.9	43.4	61.4	64.0	65.1	66.8	74.1	92.6	98.4	99.7
	Rückstand	[M.-%]	22.2	21.2	17.6	2.5	1.1	1.7	7.4	18.4	6.2	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]		22.2	43.4	61.0	63.5	64.6	66.3	73.7	92.1	98.3	99.8
	Rückstand	[M.-%]	21.5	21.2	17.8	2.6	1.1	1.7	7.0	19.3	6.0	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.5	42.7	60.5	63.1	64.2	65.9	72.9	92.2	98.2	99.7
	Rückstand	[M.-%]	21.7	21.2	17.9	2.5	1.1	1.7	7.1	19.5	5.5	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.7	42.9	60.7	63.3	64.3	66.0	73.2	92.7	98.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	21.4	21.2	17.8	2.7	1.1	1.8	7.5	18.7	6.2	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.4	42.6	60.4	63.1	64.2	66.0	73.5	92.2	98.4	99.8
	Rückstand	[M.-%]	21.6	20.8	18.2	2.6	1.1	1.7	7.8	18.6	6.1	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.6	42.5	60.7	63.3	64.5	66.2	74.0	92.5	98.6	99.8
Ø	Durchgang	[M.-%]	21.7	42.9	60.8	63.4	64.5	66.2	73.6	92.4	98.4	99.7	21.7
	σ	[M.-%]	-	0.276	0.382	0.357	0.352	0.331	0.334	0.468	0.245	0.147	0.066

Quarzit 17

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	17.7	16.8	27.8	8.9	1.8	2.0	5.7	14.0	3.9	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.7	34.5	62.3	71.2	73.0	75.0	80.7	94.8	98.7	99.8
	Rückstand	[M.-%]	17.4	17.0	27.3	8.9	1.9	2.0	5.5	14.8	4.1	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.4	34.4	61.7	70.6	72.5	74.5	80.0	94.8	98.9	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.8	18.8	28.2	7.0	1.4	1.6	5.3	13.4	3.6	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.8	38.6	66.8	73.8	75.2	76.8	82.1	95.5	99.1	99.8
	Rückstand	[M.-%]	20.0	18.9	27.9	6.6	1.4	1.6	5.1	14.2	3.4	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.0	38.9	66.8	73.4	74.8	76.4	81.4	95.6	99.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	20.2	19.5	27.7	6.5	1.4	1.6	5.5	12.9	3.6	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.2	39.7	67.4	73.9	75.3	76.9	82.4	95.3	98.9	99.7
	Rückstand	[M.-%]	20.4	19.2	28.1	6.2	1.3	1.6	5.2	13.1	3.8	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.4	39.7	67.8	74.0	75.3	76.9	82.1	95.2	99.0	99.6
Ø	Durchgang	[M.-%]	19.3	37.6	65.5	72.8	74.4	76.1	81.5	95.2	98.9	99.8	19.3
	σ	[M.-%]	-	1.318	2.494	2.729	1.507	1.264	1.066	0.948	0.343	0.154	0.099

Gneis 18

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	18.8	18.8	23.9	10.0	1.6	1.7	6.3	13.9	4.1	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.8	37.7	61.6	71.6	73.2	74.9	81.2	95.1	99.1	99.7
	Rückstand	[M.-%]	18.4	18.5	24.0	10.2	1.7	1.8	6.4	14.2	3.8	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.4	36.9	60.9	71.1	72.7	74.5	80.9	95.1	98.8	99.6
	Rückstand	[M.-%]	19.3	19.1	23.8	9.2	1.6	1.8	6.5	13.8	3.5	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.3	38.4	62.2	71.5	73.1	74.9	81.4	95.2	98.7	99.8
	Rückstand	[M.-%]	18.9	19.2	24.0	9.6	1.6	1.7	6.4	13.6	3.9	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.9	38.1	62.1	71.6	73.2	75.0	81.4	94.9	98.9	99.7
	Rückstand	[M.-%]	19.4	18.6	24.4	9.0	1.6	1.7	6.4	13.9	3.7	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.4	38.0	62.3	71.4	73.0	74.7	81.1	95.0	98.7	99.7
	Rückstand	[M.-%]	19.2	18.4	24.5	9.3	1.6	1.8	6.5	14.1	3.4	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.2	37.7	62.1	71.4	73.1	74.8	81.4	95.4	98.8	99.6
Ø	Durchgang	[M.-%]	19.0	37.8	61.9	71.4	73.1	74.8	81.2	95.1	98.8	99.7	19.0
	σ	[M.-%]	-	0.376	0.510	0.543	0.200	0.187	0.177	0.196	0.168	0.163	0.080

Orthogneis 19

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	23.8	17.4	21.3	8.0	1.9	2.2	8.1	13.0	3.2	0.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.8	41.3	62.6	70.6	72.6	74.8	82.9	95.9	99.2	99.5
	Rückstand	[M.-%]	24.3	17.9	21.4	8.1	2.1	2.1	8.2	11.3	3.7	0.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		24.3	42.2	63.6	71.7	73.8	75.9	84.1	95.4	99.1	99.7
	Rückstand	[M.-%]	23.9	17.6	21.1	8.1	2.0	2.2	8.2	12.4	3.6	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.9	41.5	62.6	70.7	72.7	74.9	83.1	95.5	99.1	99.6
	Rückstand	[M.-%]	24.0	17.5	21.3	8.2	2.0	2.2	8.3	12.7	3.3	0.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		24.0	41.4	62.7	70.9	72.9	75.1	83.4	96.1	99.4	99.7
	Rückstand	[M.-%]	23.2	17.4	21.6	8.5	2.0	2.3	8.2	13.0	3.2	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.2	40.5	62.1	70.6	72.7	74.9	83.1	96.1	99.3	99.7
	Rückstand	[M.-%]	23.3	17.4	22.0	8.4	2.0	2.2	8.4	12.6	3.2	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.3	40.6	62.7	71.1	73.0	75.3	83.6	96.2	99.4	99.9
Ø	Durchgang	[M.-%]	23.7	41.3	62.7	70.9	72.9	75.1	83.4	95.9	99.2	99.7	23.7
	σ	[M.-%]	-	0.428	0.618	0.476	0.415	0.449	0.413	0.435	0.340	0.149	0.161

Basanit 20

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	19.9	14.2	16.1	8.1	2.9	3.0	8.6	20.2	5.6	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.9	34.1	50.2	58.3	61.2	64.2	72.8	93.1	98.6	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.8	14.2	16.3	8.0	3.0	3.1	8.8	20.0	5.1	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.8	34.0	50.3	58.4	61.3	64.4	73.2	93.3	98.4	99.7
	Rückstand	[M.-%]	19.9	14.1	16.2	8.2	3.0	3.1	8.8	19.8	5.6	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.9	34.0	50.2	58.4	61.3	64.5	73.3	93.1	98.7	99.7
	Rückstand	[M.-%]	20.1	14.2	15.9	8.2	3.0	3.2	9.7	19.1	4.8	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.1	34.3	50.2	58.4	61.4	64.6	74.2	93.3	98.1	99.7
	Rückstand	[M.-%]	19.9	14.2	15.7	8.0	3.0	3.1	9.5	19.6	5.5	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.9	34.0	49.7	57.8	60.7	63.9	73.4	93.0	98.4	99.8
	Rückstand	[M.-%]	19.9	14.0	16.3	7.7	2.9	3.0	9.0	20.4	5.2	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		19.9	33.9	50.2	58.0	60.9	63.8	72.8	93.2	98.4	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	19.9	34.1	50.1	58.2	61.1	64.2	73.3	93.1	98.5	99.7	19.9
	σ	[M.-%]	-	0.095	0.111	0.209	0.264	0.274	0.311	0.517	0.129	0.218	0.054

RC (TL-Gestein) 21

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	23.1	13.4	22.5	15.3	3.3	2.5	6.3	9.7	3.1	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.1	36.5	59.0	74.3	77.6	80.1	86.4	96.1	99.2	99.9
	Rückstand	[M.-%]	23.5	13.3	22.8	14.9	3.3	2.3	6.3	9.7	3.1	0.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.5	36.8	59.6	74.5	77.8	80.1	86.5	96.1	99.3	99.9
	Rückstand	[M.-%]	23.0	13.1	22.6	15.4	3.6	2.4	6.2	9.8	3.5	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.0	36.0	58.6	74.0	77.5	79.9	86.1	95.9	99.4	100.0
	Rückstand	[M.-%]	23.0	13.0	22.5	15.1	3.4	2.4	6.3	9.9	3.5	0.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.0	36.0	58.5	73.6	77.0	79.5	85.8	95.7	99.1	99.8
	Rückstand	[M.-%]	24.0	13.7	21.9	14.3	3.3	2.4	6.2	10.2	3.2	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		24.0	37.7	59.7	74.0	77.2	79.7	85.9	96.1	99.3	99.8
	Rückstand	[M.-%]	23.7	13.6	21.8	14.8	3.3	2.5	6.2	9.9	2.8	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.7	37.3	59.1	73.8	77.1	79.6	85.8	95.7	98.5	99.6
Ø	Durchgang	[M.-%]	23.4	36.7	59.1	74.0	77.4	79.8	86.1	95.9	99.1	99.8	23.4
	σ	[M.-%]	-	0.427	0.697	0.481	0.316	0.298	0.274	0.293	0.200	0.315	0.134

RC-Ziegel 22

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	36.9	17.2	22.7	8.1	1.6	1.5	4.3	5.8	1.3	0.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.9	54.1	76.8	84.9	86.5	88.0	92.3	98.1	99.4	99.5
	Rückstand	[M.-%]	36.5	17.8	22.7	7.9	1.6	1.5	4.4	5.5	1.4	0.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.5	54.3	77.0	84.9	86.5	88.0	92.4	97.9	99.3	99.5
	Rückstand	[M.-%]	36.5	17.4	23.0	8.0	1.6	1.5	4.2	6.0	1.3	0.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.5	53.9	77.0	85.0	86.5	88.0	92.2	98.2	99.5	99.6
	Rückstand	[M.-%]	36.6	17.3	22.9	7.9	1.6	1.5	4.2	5.9	1.5	0.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.6	53.9	76.8	84.6	86.2	87.7	91.9	97.8	99.3	99.5
	Rückstand	[M.-%]	37.3	17.6	21.5	7.6	1.5	1.5	4.4	5.8	1.6	0.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		37.3	54.9	76.4	84.0	85.5	87.1	91.5	97.3	98.9	99.0
	Rückstand	[M.-%]	36.8	17.4	22.3	7.7	1.6	1.6	4.3	5.6	1.4	0.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		36.8	54.2	76.5	84.1	85.7	87.3	91.6	97.2	98.7	99.0
Ø	Durchgang	[M.-%]	36.8	54.2	76.7	84.6	86.2	87.7	92.0	97.8	99.2	99.4	36.8
	σ	[M.-%]	-	0.327	0.373	0.244	0.427	0.445	0.420	0.387	0.412	0.329	0.287

RC-Beton 23

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	18.0	11.8	21.1	18.5	4.4	2.8	6.7	12.1	3.7	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.0	29.8	50.9	69.4	73.8	76.6	83.3	95.4	99.1	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.9	11.3	21.5	18.6	4.4	2.9	6.8	11.9	3.6	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.9	29.1	50.6	69.2	73.6	76.5	83.3	95.2	98.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.2	11.1	20.0	19.1	4.7	2.9	7.2	12.6	3.9	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.2	28.4	48.4	67.5	72.2	75.1	82.3	94.9	98.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.2	11.0	20.8	19.1	4.6	3.0	7.2	12.0	4.0	1.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.2	28.1	48.9	68.1	72.6	75.7	82.8	94.8	98.8	99.9
	Rückstand	[M.-%]	16.8	11.3	20.6	18.7	4.7	3.1	7.3	12.2	4.2	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.8	28.1	48.7	67.4	72.1	75.3	82.5	94.7	98.9	99.7
	Rückstand	[M.-%]	17.6	10.8	20.4	18.4	4.5	3.1	7.4	12.3	4.3	0.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.6	28.4	48.8	67.2	71.8	74.9	82.3	94.6	98.8	99.8
Ø	Durchgang	[M.-%]	17.4	28.7	49.4	68.1	72.7	75.7	82.8	94.9	98.9	99.9	17.4
	σ	[M.-%]	-	0.459	0.677	1.067	0.946	0.833	0.743	0.463	0.309	0.128	0.091

Schmelzkammergranulat 24

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	10.8	13.4	26.5	17.0	4.2	4.0	9.5	11.2	2.9	0.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		10.8	24.2	50.7	67.7	71.9	75.9	85.4	96.5	99.4	99.8
	Rückstand	[M.-%]	10.7	13.5	25.9	17.8	4.4	3.9	10.0	11.1	2.0	0.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		10.7	24.2	50.1	67.9	72.4	76.3	86.3	97.4	99.4	99.9
	Rückstand	[M.-%]	11.0	13.9	25.8	17.7	4.2	3.8	9.6	10.8	2.4	0.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.0	24.9	50.7	68.4	72.5	76.3	86.0	96.8	99.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	11.2	13.5	26.3	17.5	4.1	3.8	9.5	10.6	2.6	0.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.2	24.7	51.0	68.5	72.6	76.4	85.9	96.6	99.2	99.9
	Rückstand	[M.-%]	10.8	13.3	26.8	17.5	4.1	3.7	9.4	10.8	2.8	0.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]		10.8	24.1	51.0	68.5	72.6	76.3	85.7	96.5	99.3	99.8
	Rückstand	[M.-%]	10.3	12.6	24.1	17.5	4.8	4.0	9.7	12.9	3.2	0.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		10.3	22.9	47.0	64.5	69.3	73.3	83.0	95.9	99.1	99.8
Ø	Durchgang	[M.-%]	10.8	24.17	50.08	67.59	71.89	75.75	85.37	96.6	99.26	99.83	10.8
	σ	[M.-%]	-	0.3038	0.6933	1.5429	1.5431	1.2853	1.2140	1.1983	0.4718	0.1424	0.0767

LD-Schlacke 26

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	11.8	6.6	9.3	10.5	5.7	6.3	15.3	24.6	7.7	2.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.8	18.3	27.6	38.1	43.8	50.2	65.5	90.1	97.8	100.0
	Rückstand	[M.-%]	11.6	6.6	9.6	10.8	6.0	6.3	14.5	24.3	8.0	2.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.6	18.2	27.8	38.6	44.6	50.9	65.4	89.7	97.7	99.8
	Rückstand	[M.-%]	11.7	6.5	9.3	10.7	5.9	6.0	15.1	25.2	7.7	1.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.7	18.2	27.5	38.2	44.1	50.1	65.2	90.4	98.1	100.0
	Rückstand	[M.-%]	12.0	6.8	9.7	10.5	5.8	6.0	14.6	25.1	7.6	2.0	0.0
	Durchgang	[M.-%]		12.0	18.8	28.5	39.0	44.7	50.7	65.3	90.4	98.0	99.9
	Rückstand	[M.-%]	11.4	6.5	9.4	10.7	5.8	6.6	15.2	24.2	7.7	2.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.4	18.0	27.4	38.1	43.9	50.6	65.7	90.0	97.6	99.9
	Rückstand	[M.-%]	11.5	6.6	9.3	10.7	6.0	6.1	14.7	25.0	7.7	2.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		11.5	18.1	27.5	38.1	44.2	50.2	64.9	89.9	97.6	100.0
Ø	Durchgang	[M.-%]	11.7	18.3	27.7	38.4	44.2	50.4	65.3	90.1	97.8	99.9	11.7
	σ	[M.-%]	-	0.200	0.284	0.390	0.341	0.359	0.334	0.270	0.274	0.207	0.062

Natursand 27

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	17.0	15.5	20.6	8.6	2.3	2.6	8.1	18.2	5.4	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.0	32.5	53.0	61.6	63.9	66.5	74.5	92.8	98.1	99.7
	Rückstand	[M.-%]	16.8	15.1	21.5	9.3	2.5	2.5	7.3	18.0	5.4	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.8	31.8	53.3	62.6	65.1	67.6	74.9	92.9	98.2	99.9
	Rückstand	[M.-%]	16.9	14.5	21.3	8.8	2.4	2.6	7.6	18.7	5.6	1.4	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.9	31.4	52.7	61.6	64.0	66.6	74.2	92.9	98.5	99.9
	Rückstand	[M.-%]	16.7	14.6	21.4	9.1	2.4	2.5	7.9	18.3	5.1	1.9	0.0
	Durchgang	[M.-%]		16.7	31.3	52.7	61.8	64.2	66.7	74.6	92.9	98.0	99.8
	Rückstand	[M.-%]	17.3	15.4	19.9	8.9	2.4	2.6	8.1	18.0	5.5	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.3	32.7	52.6	61.5	64.0	66.6	74.7	92.7	98.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	17.6	15.3	20.2	8.6	2.4	2.5	7.8	18.5	5.2	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.6	32.9	53.1	61.7	64.1	66.6	74.4	92.9	98.1	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	17.0	32.1	52.9	61.8	64.2	66.8	74.6	92.9	98.2	99.8	17.0
	σ	[M.-%]	-	0.358	0.687	0.257	0.414	0.451	0.432	0.242	0.082	0.185	0.090

Natursand 28

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	18.3	16.6	24.8	10.0	2.2	2.4	6.6	13.6	3.9	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.3	35.0	59.8	69.8	71.9	74.3	80.9	94.4	98.3	99.8
	Rückstand	[M.-%]	23.9	11.2	24.7	9.4	2.2	2.3	6.9	14.0	3.8	1.3	0.0
	Durchgang	[M.-%]		23.9	35.1	59.9	69.3	71.5	73.8	80.7	94.8	98.6	99.9
	Rückstand	[M.-%]	17.7	17.4	24.1	9.7	2.4	2.3	6.7	14.4	3.8	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		17.7	35.1	59.2	68.9	71.3	73.6	80.3	94.7	98.5	99.7
	Rückstand	[M.-%]	18.0	16.9	24.4	9.8	2.3	2.3	6.9	13.5	4.6	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.0	34.9	59.3	69.1	71.4	73.7	80.7	94.1	98.7	99.8
	Rückstand	[M.-%]	18.9	16.8	23.8	9.2	2.3	2.3	7.3	13.8	4.3	1.1	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.9	35.7	59.5	68.7	70.9	73.3	80.6	94.4	98.7	99.8
	Rückstand	[M.-%]	18.2	16.3	23.7	9.6	2.3	2.4	7.1	14.3	4.1	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		18.2	34.5	58.2	67.8	70.1	72.5	79.6	93.9	98.0	99.2
Ø	Durchgang	[M.-%]	19.2	35.0	59.3	68.9	71.2	73.5	80.5	94.4	98.5	99.7	19.2
	σ	[M.-%]	-	0.256	0.476	0.419	0.583	0.755	0.928	1.193	0.513	0.296	0.239

Natursand 29

Nr.	Siebweite	[mm]	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0	5,6
	Rückstand	[M.-%]	20.7	14.2	21.1	9.3	2.3	2.3	6.7	16.4	5.1	1.8	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.7	34.9	56.0	65.4	67.6	69.9	76.6	93.0	98.1	99.9
	Rückstand	[M.-%]	20.6	14.7	20.9	9.4	2.3	2.4	7.3	15.7	5.1	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.6	35.3	56.2	65.6	68.0	70.3	77.6	93.3	98.4	99.8
	Rückstand	[M.-%]	20.2	15.3	21.4	9.1	2.2	2.2	6.9	16.2	4.8	1.6	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.2	35.5	56.8	65.9	68.1	70.3	77.2	93.4	98.2	99.8
	Rückstand	[M.-%]	20.7	14.8	21.7	9.0	2.3	2.3	7.2	15.9	4.7	1.2	0.0
	Durchgang	[M.-%]		20.7	35.5	57.2	66.3	68.5	70.8	78.0	93.9	98.6	99.8
	Rückstand	[M.-%]	21.1	15.5	20.9	8.8	2.0	2.2	6.8	16.5	4.4	1.7	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.1	36.6	57.5	66.3	68.3	70.5	77.3	93.8	98.2	99.9
	Rückstand	[M.-%]	21.0	15.7	20.8	8.7	2.1	2.2	6.9	16.3	4.5	1.5	0.0
	Durchgang	[M.-%]		21.0	36.7	57.5	66.2	68.3	70.5	77.4	93.7	98.2	99.7
Ø	Durchgang	[M.-%]	20.7	35.8	56.9	65.9	68.1	70.4	77.4	93.5	98.3	99.8	20.7
	σ	[M.-%]	-	0.335	0.732	0.640	0.372	0.321	0.286	0.466	0.355	0.169	0.060

Tabelle A-1: Siebdurchgänge nach Beanspruchung durch das MMD-Verfahren (Übersicht)

Gesteinsart	Durchgang in M.-% nach Abriebbeanspruchung für die jeweiligen Analysesiebe (Nennöffnungsweite in mm)								
	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1,0	2,0	4,0	5,0
Zusammen- setzung vor Abrieb	0	0	0	20	30	37	60	88	97
dol. Kalkstein 1	34,7	53,5	64,8	67,7	69,2	71,2	78,6	94,0	98,5
Kalkstein 2	19,3	30,6	44,9	53,2	56,8	60,9	71,2	92,4	98,8
Kalkstein 3	24,9	36,7	48,6	55,3	58,3	61,9	71,1	92,9	98,5
Kalkstein 4	31,4	46,7	59,4	63,8	65,8	68,4	77,6	94,0	98,8
Grauwacke 5	35,7	50,3	57,5	60,2	61,9	64,2	72,8	92,7	98,4
Grauwacke 6	19,8	31,4	45,1	51,8	54,6	58,1	67,9	92,6	98,5
Grauwacke 7	35,0	51,1	58,9	61,5	63,1	65,4	74,1	92,8	98,7
Diabas 8	18,0	28,2	42,0	50,6	53,8	57,5	68,0	91,3	98,1
Diabas 9	22,4	33,6	47,4	55,5	58,8	62,3	74,4	93,5	99,1
Basalt 10	23,9	37,7	51,7	58,0	60,8	63,9	74,0	92,6	98,4
Basalt 11	17,2	26,0	37,4	47,5	51,9	56,8	67,9	91,8	98,0
Granit 12	18,7	35,6	59,0	67,5	69,6	71,9	79,2	93,6	98,4
Granit 13	17,0	33,9	59,6	70,4	72,6	74,6	80,8	94,6	98,9
Rhyolith 14	14,0	22,0	36,3	47,8	52,2	56,8	68,7	91,6	98,3
Rhyolith 15	32,1	50,6	63,3	66,4	67,7	69,4	76,3	94,1	99,1
Quarzit 16	21,7	42,9	60,8	63,4	64,5	66,2	73,6	92,4	98,4
Quarzit 17	19,3	37,6	65,5	72,8	74,4	76,1	81,5	95,2	98,9
Gneis 18	19,0	37,8	61,9	71,4	73,1	74,8	81,2	95,1	98,8
Orthogneis 19	23,7	41,3	62,7	70,9	72,9	75,1	83,4	95,9	99,2
Basanit 20	19,9	34,1	50,1	58,2	61,1	64,2	73,3	93,1	98,5
RC (TL Gest.) 21	23,4	36,7	59,1	74,0	77,4	79,8	86,1	95,9	99,1
RC (Ziegel) 22	36,8	54,2	76,7	84,6	86,2	87,7	92,0	97,8	99,2
RC (Beton) 23	17,4	28,7	49,4	68,1	72,7	75,7	82,8	94,9	98,9
SKG 24	10,8	24,2	50,1	67,6	71,9	75,8	85,4	96,6	99,3
Hüttensand 25	Zusammensetzung der Probe 0,25/5,6 aufgrund zu geringer Korndurchmesser nicht möglich								
LD-Schlacke 26	11,7	18,3	27,7	38,4	44,2	50,4	65,3	90,1	97,8
Natursand 27	17,0	32,1	52,9	61,8	64,2	66,8	74,6	92,9	98,2
Natursand 28	19,2	35,0	59,3	68,9	71,2	73,5	80,5	94,4	98,5
Natursand 29	20,7	35,8	56,9	65,9	68,1	70,4	77,4	93,5	98,3

Tabelle A-2: Standardabweichungen des MMD-Verfahrens aus 6 Einzelmessungen

Gestein	0,063	0,125	0,25	0,5	0,71	1	2	4	5
dol. Kalkstein 1	0,3577	0,5872	0,3196	0,3239	0,3351	0,3002	0,2922	0,3350	0,2247
Kalkstein 2	0,2949	0,3472	0,2770	0,2532	0,2276	0,1920	0,3251	0,2875	0,1688
Kalkstein 3	0,4821	0,5759	0,4025	0,3656	0,3625	0,3644	0,3190	0,1730	0,2063
Kalkstein 4	0,6030	0,6570	0,3957	0,4769	0,5206	0,5820	0,7732	0,4550	0,3482
Grauwacke 5	0,5225	0,6294	0,5743	0,6136	0,6298	0,6428	0,7958	0,4223	0,3847
Grauwacke 6	0,1225	0,1198	0,1822	0,1638	0,1979	0,2161	0,1041	0,2150	0,1907
Grauwacke 7	0,4129	0,5105	0,1134	0,1108	0,1556	0,1697	0,5357	0,2570	0,0777
Diabas 8	0,1969	0,3612	0,4060	0,2817	0,2888	0,3073	0,2891	0,2013	0,1752
Diabas 9	0,3618	0,4647	0,5611	0,6054	0,6338	0,6702	0,6484	0,2956	0,1464
Basalt 10	0,2474	0,1858	0,3113	0,3339	0,4108	0,3998	0,5633	0,2126	0,0753
Basalt 11	0,9280	1,0858	1,2500	0,6159	0,5673	0,4118	0,4895	0,4281	0,2354
Granit 12	0,0891	0,3932	0,3189	0,4479	0,5035	0,5718	0,7874	0,3416	0,1401
Granit 13	0,1018	0,3159	0,3435	0,3760	0,4416	0,4352	0,4902	0,2197	0,2304
Rhyolith 14	0,2175	0,2897	0,2954	0,3005	0,2650	0,2851	0,3602	0,3667	0,2043
Rhyolith 15	0,4253	0,4007	0,3019	0,3760	0,3823	0,3509	0,4828	0,2714	0,1407
Quarzit 16	0,2764	0,3829	0,3572	0,3521	0,3317	0,3346	0,4680	0,2457	0,1479
Quarzit 17*	0,2842	0,5666	0,4745	0,2574	0,2537	0,2636	0,4165	0,1770	0,1147
Gneis 18	0,3767	0,5108	0,5436	0,2002	0,1871	0,1777	0,1965	0,1688	0,1638
Orthogneis 19	0,4283	0,6187	0,4768	0,4157	0,4493	0,4137	0,4352	0,3403	0,1494
Basanit 20	0,0955	0,1117	0,2094	0,2642	0,2747	0,3119	0,5170	0,1292	0,2183
RC (TL Gest.) 21	0,4274	0,6978	0,4813	0,3161	0,2984	0,2741	0,2938	0,2006	0,3153
RC (Ziegel) 22	0,3270	0,3730	0,2442	0,4270	0,4453	0,4209	0,3876	0,4123	0,3290
RC (Beton) 23	0,4598	0,6774	1,0672	0,9464	0,8336	0,7433	0,4630	0,3095	0,1281
SKG 24	0,3038	0,6933	1,5429	1,5431	1,2853	1,2140	1,1983	0,4718	0,1424
LD-Schlacke 26	0,2005	0,2840	0,3908	0,3412	0,3597	0,3345	0,2706	0,2743	0,2074
Natursand 27	0,3585	0,6878	0,2579	0,4144	0,4510	0,4324	0,2427	0,0829	0,1852
Natursand 28	0,2569	0,4762	0,4190	0,5831	0,7557	0,9287	1,1932	0,5136	0,2961
Natursand 29	0,3358	0,7323	0,6407	0,3720	0,3217	0,2867	0,4662	0,3557	0,1699
Min	0,089	0,112	0,113	0,111	0,156	0,170	0,104	0,083	0,075
Max	0,928	1,086	1,543	1,543	1,285	1,214	1,198	0,514	0,385
Spanne	0,839	0,974	1,429	1,432	1,130	1,044	1,094	0,431	0,309
Arith Mittel	0,3391	0,4906	0,4699	0,4314	0,4346	0,4298	0,4930	0,2916	0,1970

*Versuche 1 und 2 wurden nicht berücksichtigt

Prallprüfung an Sand in der Kugelmühle nach TP Min-StB, 5.4.2

K 1	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	20	80.0	20.4	79.6	19.9	80.1	20.3	79.7	22.2	77.8	18.2	81.8	20.2
0,25	34.1	45.9	33.3	46.3	33.6	46.5	32.8	46.9	31.6	46.2	34.6	47.2	33.3
0,09	32	13.9	31.8	14.5	31.9	14.6	31.9	15.0	31.3	14.9	32.1	15.1	31.8
< 0,09	13.9		14.5		14.6		15		14.9		15.1		14.7
Σ	100	139.8	100	140.4	100	141.2	100	141.6	100	138.9	100	144.1	100.0
A_{KM}		19.9		20.1		20.4		20.5		19.6		21.4	20.3

Standardabweichung σ [M.-%] 0.6003

K 2	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	25.4	74.6	25.8	74.2	25.6	74.4	25.6	74.4	25.6	74.4	25.1	74.9	25.5
0,25	39.7	34.9	38.9	35.3	39.2	35.2	40	34.4	39.9	34.5	40.2	34.7	39.7
0,09	27.2	7.7	27.8	7.5	27.6	7.6	27	7.4	27	7.5	27.2	7.5	27.3
< 0,09	7.7		7.5		7.6		7.4		7.5		7.5		7.5
Σ	100	117.2	100	117.0	100	117.2	100	116.2	100	116.4	100	117.1	100.0
A_{KM}		12.4		12.3		12.4		12.1		12.1		12.4	12.3

Standardabweichung σ [M.-%] 0.1457

K 3	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	23.6	76.4	24.1	75.9	24.6	75.4	24.2	75.8	25.9	74.1	24.5	75.5	24.5
0,25	39.1	37.3	38.4	37.5	38.5	36.9	39.1	36.7	38.3	35.8	38.2	37.3	38.6
0,09	26.1	11.2	26.7	10.8	26.5	10.4	26.5	10.2	25.5	10.3	26.2	11.1	26.3
< 0,09	11.2		10.8		10.4		10.2		10.3		11.1		10.7
Σ	100	124.9	100	124.2	100	122.7	100	122.7	100	120.2	100	123.9	100.0
A_{KM}		15.0		14.7		14.2		14.2		13.4		14.6	14.4

Standardabweichung σ [M.-%] 0.5542

K 4	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	18.9	81.1	23.5	76.5	22.1	77.9	19.6	80.4	21.5	78.5	19.1	80.9	20.8
0,25	37.8	43.3	34.5	42.0	35.7	42.2	36.9	43.5	35.7	42.8	37.0	43.9	36.3
0,09	29.0	14.3	28.1	13.9	28.3	13.9	28.8	14.7	28.6	14.2	29.3	14.6	28.7
< 0,09	14.3		13.9		13.9		14.6		14.2		14.6		14.3
Σ	100	138.7	100	132.4	100	134.0	99.9	138.6	100	135.5	100	139.4	100.0
A_{KM}		19.6		17.5		18.0		19.5		18.5		19.8	18.8

Standardabweichung σ [M.-%] 0.9626

R = Rückstand D = Durchgang

GW 5	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	30.7	69.3	29.7	70.3	29.1	70.9	28	72.0	28.8	71.2	26.9	73.1	28.9
0,25	34.4	34.9	36	34.3	36.9	34.0	36.7	35.3	35.9	35.3	37.2	35.9	36.2
0,09	23	11.9	23.3	11.0	23.2	10.8	24	11.3	23.8	11.5	24.4	11.5	23.6
< 0,09	11.9		11		10.8		11.3		11.5		11.5		11.3
Σ	100	116.1	100	115.6	100	115.7	100	118.6	100	118.0	100	120.5	100.0
A_{KM}		12.0		11.9		11.9		12.9		12.7		13.5	12.5

Standardabweichung σ [M.-%] 0.6537

GW 6	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	33.3	66.7	32.3	67.7	34.3	65.7	33.5	66.5	33.3	66.7	33.8	66.2	33.4
0,25	35.2	31.5	36.7	31.0	35	30.7	35.7	30.8	35.4	31.3	34.2	32.0	35.4
0,09	24.4	7.1	23.7	7.3	23.4	7.3	23.6	7.2	24	7.3	24.7	7.3	24.0
< 0,09	7.1		7.3		7.3		7.2		7.3		7.3		7.3
Σ	100	105.3	100	106.0	100	103.7	100	104.5	100	105.3	100	105.5	100.0
A_{KM}		8.4		8.7		7.9		8.2		8.4		8.5	8.4

Standardabweichung σ [M.-%] 0.2730

GW 7	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	30.7	69.3	28.7	71.3	26.3	73.7	28.7	71.3	28.4	71.6	27.8	72.2	28.4
0,25	31.8	37.5	33.9	37.4	34.9	38.8	32.8	38.5	33.5	38.1	33.9	38.3	33.5
0,09	20	17.5	22.4	15.0	23.5	15.3	22.1	16.4	21	17.1	22.3	16.0	21.9
< 0,09	17.5		15		15.3		16.4		17.1		16		16.2
Σ	100	124.3	100	123.7	100	127.8	100	126.2	100	126.8	100	126.5	100.0
A_{KM}		14.8		14.6		15.9		15.4		15.6		15.5	15.3

Standardabweichung σ [M.-%] 0.5221

D 8	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	28.1	71.9	26.8	73.2	27.2	72.8	30.1	69.9	28.4	71.6	29.1	70.9	28.3
0,25	38.9	33.0	38.9	34.3	39.3	33.5	38.1	31.8	39.2	32.4	38	32.9	38.7
0,09	26	7.0	27.2	7.1	26.4	7.1	25.4	6.4	25.8	6.6	26	6.9	26.1
< 0,09	7		7.1		7.1		6.4		6.6		6.9		6.9
Σ	100	111.9	100	114.6	100	113.4	100	108.1	100	110.6	100	110.7	100.0
A_{KM}		10.6		11.5		11.1		9.4		10.2		10.2	10.5

Standardabweichung σ [M.-%] 0.7656

R = Rückstand D = Durchgang

D 9	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	29.2	70.8	28.7	71.3	28.8	71.2	28.1	71.9	28.8	71.2	27.7	72.3	28.6
0,25	36.6	34.2	38.1	33.2	37.5	33.7	38	33.9	37.2	34.0	38.8	33.5	37.7
0,09	25.1	9.1	24.7	8.5	25.4	8.3	25.2	8.7	25.3	8.7	25	8.5	25.1
< 0,09	9.1		8.5		8.3		8.6		8.7		8.5		8.6
Σ	100	114.1	100	113.0	100	113.2	99.9	114.5	100	113.9	100	114.3	100.0
A _{KM}		11.4		11.0		11.1		11.5		11.3		11.4	11.3

Standardabweichung σ [M.-%] 0.2018

B 10	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	28.9	71.1	30	70.0	27.6	72.4	27.5	72.5	27.3	72.7	24.9	75.1	27.7
0,25	38.7	32.4	38.2	31.8	39.1	33.3	37.7	34.8	38.3	34.4	39.3	35.8	38.6
0,09	22.7	9.7	23	8.8	23.6	9.7	24.3	10.5	24.2	10.2	24.7	11.1	23.8
< 0,09	9.7		8.8		9.7		10.5		10.2		11.1		10.0
Σ	100	113.2	100	110.6	100	115.4	100	117.8	100	117.3	100	122.0	100.0
A _{KM}		11.1		10.2		11.8		12.6		12.4		14.0	12.0

Standardabweichung σ [M.-%] 1.3189

B 11	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	32.4	67.6	32.9	67.1	33.1	66.9	32.7	67.3	34.5	65.5	33.5	66.5	33.2
0,25	39.8	27.8	39.0	28.1	38.8	28.1	39.5	27.8	37.9	27.6	38.9	27.6	39.0
0,09	20.8	7.0	21.0	7.1	21.1	7.0	20.4	7.4	20.6	7.0	20.5	7.1	20.7
< 0,09	7		7.1		7.0		7.2		6.8		7.1		7.0
Σ	100	102.4	100	102.3	100	102.0	99.8	102.5	99.8	100.1	100	101.2	99.9
A _{KM}		7.5		7.4		7.3		7.5		6.7		7.1	7.3

Standardabweichung σ [M.-%] 0.3118

GR 12	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	24.3	75.7	22.9	77.1	22.8	77.2	22.3	77.7	20.5	79.5	21.8	78.2	22.4
0,25	40.4	35.3	40.7	36.4	40.5	36.7	40.2	37.5	41.8	37.7	39.5	38.7	40.5
0,09	27.9	7.4	28.1	8.3	28.1	8.6	28.6	8.9	28.8	8.9	29.4	9.3	28.5
< 0,09	7.4		8.3		8.6		8.9		8.9		9.3		8.6
Σ	100	118.4	100	121.8	100	122.5	100	124.1	100	126.1	100	126.2	100.0
A _{KM}		12.8		13.9		14.2		14.7		15.4		15.4	14.4

Standardabweichung σ [M.-%] 0.9855

R = Rückstand D = Durchgang

GR 13	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb-größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	20.4	79.6	18.8	81.2	18.7	81.3	16.6	83.4	18.4	81.6	17.9	82.1	18.5
0,25	40.9	38.7	42	39.2	42.4	38.9	43.5	39.9	42.5	39.1	42.4	39.7	42.3
0,09	30.3	8.4	30.7	8.5	30.2	8.7	31	8.9	30.4	8.7	31.1	8.6	30.6
< 0,09	8.5		8.5		8.7		8.9		8.7		8.6		8.7
Σ	100.1	126.7	100	128.9	100	128.9	100	132.2	100	129.4	100	130.4	100.0
A _{KM}		15.6		16.3		16.3		17.4		16.5		16.8	16.5

Standardabweichung σ [M.-%] 0.6079

RHY14	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb-größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	32.2	67.8	32	68.0	32.7	67.3	33.2	66.8	33.6	66.4	33.2	66.8	32.8
0,25	39.5	28.3	39.3	28.7	38.6	28.7	38.6	28.2	38.2	28.2	38.7	28.1	38.8
0,09	23.2	5.1	23.1	5.6	23.5	5.2	22.5	5.7	23	5.2	23	5.1	23.1
< 0,09	5.1		5.6		5.2		5.7		5.2		5.1		5.3
Σ	100	101.2	100	102.3	100	101.2	100	100.7	100	99.8	100	100.0	100.0
A _{KM}		7.1		7.4		7.1		6.9		6.6		6.7	7.0

Standardabweichung σ [M.-%] 0.3053

RHY15	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb-größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	21.4	78.6	23	77.0	25.1	74.9	23.9	76.1	24	76.0	23.4	76.6	23.5
0,25	35.8	42.8	35.5	41.5	34	40.9	34.8	41.3	33.5	42.5	33.6	43.0	34.5
0,09	27.7	15.1	25.3	16.2	25.4	15.5	25.2	16.1	27.7	14.8	26.9	16.1	26.4
< 0,09	15.1		16.2		15.5		16.1		14.8		16.1		15.6
Σ	100	136.5	100	134.7	100	131.3	100	133.5	100	133.3	100	135.7	100.0
A _{KM}		18.8		18.2		17.1		17.8		17.8		18.6	18.1

Standardabweichung σ [M.-%] 0.6235

Q 16	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb-größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	24.3	75.7	22.1	77.9	21.7	78.3	22.8	77.2	20.2	79.8	22.6	77.4	22.3
0,25	29.2	46.5	30.6	47.3	31.3	47.0	30.7	46.5	29.9	49.9	29.9	47.5	30.3
0,09	29.9	16.6	30.1	17.2	33.2	13.8	31.6	14.9	31.4	18.5	31.1	16.4	31.2
< 0,09	16.6		17.2		13.8		14.9		18.5		16.4		16.2
Σ	100	138.8	100	142.4	100	139.1	100	138.6	100	148.2	100	141.3	100.0
A _{KM}		19.6		20.8		19.7		19.5		22.7		20.4	20.5

Standardabweichung σ [M.-%] 1.2215

R = Rückstand D = Durchgang

Q 17	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	19	81.0	18	82.0	19.7	80.3	25.1	74.9	20.7	79.3	19.6	80.4	20.4
0,25	35.4	45.6	36.9	45.1	35.6	44.7	33.1	41.8	37.7	41.6	37.3	43.1	36.0
0,09	30.6	15.0	28.5	16.6	30.2	14.5	26.8	15.0	28.9	12.7	29.3	13.8	29.1
< 0,09	15		16.6		14.5		15		12.7		13.8		14.6
Σ	100	141.6	100	143.7	100	139.5	100	131.7	100	133.6	100	137.3	100.0
A _{KM}		20.5		21.2		19.8		17.2		17.9		19.1	19.3

Standardabweichung σ [M.-%] 1.5433

GN 18	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	24.3	75.7	22.9	77.1	22.8	77.2	22.3	77.7	20.5	79.5	21.8	78.2	22.4
0,25	40.4	35.3	40.7	36.4	40.5	36.7	40.2	37.5	41.8	37.7	39.5	38.7	40.5
0,09	27.9	7.4	28.1	8.3	28.1	8.6	28.6	8.9	28.8	8.9	29.4	9.3	28.5
< 0,09	7.4		8.3		8.6		8.9		8.9		9.3		8.6
Σ	100	118.4	100	121.8	100	122.5	100	124.1	100	126.1	100	126.2	100.0
A _{KM}		12.8		13.9		14.2		14.7		15.4		15.4	14.4

Standardabweichung σ [M.-%] 0.9855

GN 19	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	15.8	84.2	20	80.0	19	81.0	18	82.0	18.7	81.3	18.1	81.9	18.3
0,25	34.6	49.6	33.1	46.9	33.1	47.9	33.5	48.5	33.7	47.6	33.7	48.2	33.6
0,09	34.2	15.4	32.3	14.6	34.9	13.0	36.7	11.8	36.5	11.1	33.6	14.6	34.7
< 0,09	15.4		14.6		13		11.8		11.1		14.6		13.4
Σ	100	149.2	100	141.5	100	141.9	100	142.3	100	140.0	100	144.7	100.0
A _{KM}		23.1		20.5		20.6		20.8		20.0		21.6	21.1

Standardabweichung σ [M.-%] 1.0940

BS 20	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	25.2	74.8	24.0	76.0	23.4	76.6	25.6	74.4	24.1	75.9	24.7	75.3	24.5
0,25	38.3	36.5	39.8	36.2	39.1	37.5	37.2	37.2	39.3	36.6	38.9	36.4	38.8
0,09	25.4	11.1	25.5	10.7	26.2	11.3	25.9	11.3	25.5	11.1	25.0	11.4	25.6
< 0,09	11.1		10.8		11.3		11.3		11.1		11.4		11.2
Σ	100	122.4	100.1	122.9	100	125.4	100	122.9	100	123.6	100	123.1	100.0
A _{KM}		14.1		14.3		15.1		14.3		14.5		14.4	14.5

Standardabweichung σ [M.-%] 0.3537

R = Rückstand D = Durchgang

TL 21	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	18.2	81.8	18	82.0	17	83.0	18	82.0	20.6	79.4	19.8	80.2	18.2
0,25	40.4	41.4	40.6	41.4	41.3	41.7	40.8	41.2	40.1	39.3	39.7	40.5	40.6
0,09	29.6	11.8	29.1	12.3	31.3	10.4	29	12.2	28.2	11.1	29.6	10.9	29.7
< 0,09	11.8		12.3		10.4		12.2		11.1		10.9		11.5
Σ	100	135.0	100	135.7	100	135.1	100	135.4	100	129.8	100	131.6	100.0
A_{KM}		18.3		18.6		18.4		18.5		16.6		17.2	18.2

Standardabweichung σ [M.-%] 0.8183

RCZ22	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	13.5	86.5	14.3	85.7	16.2	83.8	13.9	86.1	13.9	86.1	13.6	86.4	14.2
0,25	41.0	45.5	40.2	45.5	39.2	44.6	38.9	47.2	35.7	50.4	40.9	45.5	39.3
0,09	30.5	15.0	30	15.5	29.7	14.9	31.5	15.7	32.4	18.0	30.4	15.1	30.8
< 0,09	15.0		15.5		14.9		15.7		18.0		25.1		17.4
Σ	100	147.0	100	146.7	100	143.3	100	149.0	100	154.5	110	147.0	101.7
A_{KM}		22.3		22.2		21.1		23.0		24.8		22.3	22.6

Standardabweichung σ [M.-%] 1.2382

RCB23	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	19.2	80.8	19.1	80.9	19.2	80.8	20.4	79.6	19.5	80.5	19.9	80.1	19.4
0,25	36.9	43.9	39.5	41.4	37.9	42.9	43.7	35.9	37.6	42.9	37.6	42.5	37.9
0,09	33.7	10.2	31.5	9.9	32.8	10.1	26.8	9.1	33	9.9	32.5	10.0	32.7
< 0,09	10.2		9.9		10.1		9.1		9.9		10		10.0
Σ	100	134.9	100	132.2	100	133.8	100	124.6	100	133.3	100	132.6	100.0
A_{KM}		18.3		17.4		17.9		14.9		17.8		17.5	17.8

Standardabweichung σ [M.-%] 1.2332

SKG24	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	32.7	67.3	33.7	66.3	33.5	66.5	35.4	64.6	35	65.0	34.3	65.7	34.1
0,25	40.7	26.6	39.8	26.5	40.5	26.0	37.6	27.0	39.2	25.8	40	25.7	39.6
0,09	23.8	2.8	23.6	2.9	23.1	2.9	23.5	3.5	22.9	2.9	22.9	2.8	23.3
< 0,09	2.8		2.9		2.9		3.5		2.9		2.8		3.0
Σ	100	96.7	100	95.7	100	95.4	100	95.1	100	93.7	100	94.2	100.0
A_{KM}		5.6		5.2		5.1		5.0		4.6		4.7	5.0

Standardabweichung σ [M.-%] 0.3582

R = Rückstand D = Durchgang

HS 25	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	11.5	88.5	10.9	89.1	12.3	87.7	7.1	92.9	11.3	88.7	7.5	92.5	10.1
0,25	57	31.5	56.6	32.5	55.9	31.8	58.7	34.2	57.2	31.5	57.5	35.0	57.2
0,09	25.8	5.7	27.1	5.4	26.2	5.6	27.7	6.5	26	5.5	28.4	6.6	26.9
< 0,09	5.7		5.4		5.6		6.5		5.5		6.6		5.9
Σ	100	125.7	100	127.0	100	125.1	100	133.6	100	125.7	100	134.1	100.0
A _{KM}		15.2	AKM	15.7	AKM	15.0	AKM	17.9	AKM	15.2	AKM	18.0	16.2

Standardabweichung σ [M.-%] 1.3893

LDS26	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	33.1	66.9	33.4	66.6	33.2	66.8	34.3	65.7	33.8	66.2	33.5	66.5	33.6
0,25	37.2	29.7	37.4	29.2	37.2	29.6	36.5	29.2	35.9	30.3	37.7	28.8	37.0
0,09	22.6	7.1	21.9	7.3	22.3	7.3	21.9	7.3	23.5	6.8	21.6	7.2	22.3
< 0,09	7.1		7.3		7.3		7.3		6.8		7.2		7.2
Σ	100	103.7	100	103.1	100	103.7	100	102.2	100	103.3	100	102.5	100.0
A _{KM}		7.9		7.7		7.9		7.4		7.8		7.5	7.7

Standardabweichung σ [M.-%] 0.2070

NS 27	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	23.9	76.1	25	75.0	23.1	76.9	27.9	72.1	25.8	74.2	27.2	72.8	25.5
0,25	45.1	31.0	44.2	30.8	45.6	31.3	42.9	29.2	44.1	30.1	41.9	30.9	44.0
0,09	26.4	4.6	26.1	4.7	26.7	4.6	25	4.2	25.8	4.3	26.4	4.5	26.1
< 0,09	4.6		4.7		4.6		4.2		4.3		4.5		4.5
Σ	100	111.7	100	110.5	100	112.8	100	105.5	100	108.6	100	108.2	100.0
A _{KM}		10.6		10.2		10.9		8.5		9.5		9.4	9.9

Standardabweichung σ [M.-%] 0.8846

NS 28	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	24.8	75.2	24	76.0	21.6	78.4	23.9	76.1	23.8	76.2	24.9	75.1	23.8
0,25	41.4	33.8	41.8	34.2	43.3	35.1	42.8	33.3	42.4	33.8	41.1	34.0	42.1
0,09	27.4	6.4	27.7	6.5	28.6	6.5	27.1	6.2	27.6	6.2	27.8	6.2	27.7
< 0,09	6.4		6.5		6.5		6.2		6.2		6.2		6.3
Σ	100	115.4	100	116.7	100	120.0	100	115.6	100	116.2	100	115.3	100.0
A _{KM}		11.8		12.2		13.3		11.9		12.1		11.8	12.2

Standardabweichung σ [M.-%] 0.5932

R = Rückstand D = Durchgang

NS 29	I		II		III		IV		V		VI		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	26.8	73.2	28.1	71.9	26.9	73.1	27.7	72.3	27.5	72.5	25.8	74.2	27.1
0,25	41.2	32.0	39.6	32.3	41	32.1	39.5	32.8	40.6	31.9	42	32.2	40.7
0,09	26.7	5.3	27.2	5.1	26.9	5.2	27.5	5.3	26.8	5.1	26.7	5.5	27.0
< 0,09	5.3		5.1		5.2		5.3		5.1		5.5		5.3
Σ	100	110.5	100	109.3	100	110.4	100	110.4	100	109.5	100	111.9	100.0
A _{KM}		10.2		9.8		10.1		10.1		9.8		10.6	10.1

Standardabweichung σ [M.-%] 0.3074

Fläche P1 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	31.8	68.2	31.2	68.8		33.2	66.8	32.0	68.0	
0,25	34.1	34.1	35.1	33.7		33.4	33.4	33.9	42.1	
0,09	24.7	9.4	24.4	9.3		23.9	9.5	24.7	9.4	
< 0,09	9.4		9.3			9.5		9.4		
Σ	100	111.7	100	111.8		100	109.7	100	111.5	
A _{KM}		10.6		10.6	10.6		9.9		10.5	10.2

Fläche P2 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		V	Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	D	R	D	R	D	R	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	
0,71	30.1	69.9	30.06	69.94		28.6	71.4	31.1	68.9	29.2	70.8
0,25	40.71	29.19	40.46	29.48		41.1	30.3	39.4	29.5	40.3	30.5
0,09	24.24	4.95	24.41	5.07		25.1	5.2	24.2	5.3	25.4	5.1
< 0,09	4.95		5.07			5.2		5.3		5.1	
Σ	100	104.0	100	104.4		100	106.9	100	103.7	100	106.4
A _{KM}		8.01		8.16	8.1		9.0		7.9		8.8

Fläche P3 belastet (III und IV)

	III		IV		Mittel
Sieb- größe	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	29.6	70.4	31.0	69.0	
0,25	38.6	31.8	36.4	32.5	
0,09	25.4	6.4	26.9	5.6	
< 0,09	6.4		5.6		
Σ	100	108.6	100	107.1	
A _{KM}		9.5		9.0	9.25

R = Rückstand D = Durchgang

Fläche P4 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		V		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	D	R	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	19.6	79.4	18.5	81.5		19.3	80.7	20.8	79.2	19.5	80.5	
0,25	41.5	38.9	43.5	38.0		43.2	37.5	44.2	35.0	43.0	37.5	
0,09	31.2	7.7	30.0	8.0		30.8	6.7	28.4	6.6	30.4	7.1	
< 0,09	7.7		8.0			6.7		6.6		7.1		
Σ	100	126	100	127.5		100	124.9	100	120.8	100	125.1	
A _{KM}		15.3		15.8	15.55		15.0		13.6		15.0	14.5

Fläche P5 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	27.8	72.2	29.8	70.2		22.4	77.6	23.1	76.9	
0,25	38.2	34.0	37.2	33.0		42.4	35.2	42.1	34.8	
0,09	27.3	6.7	26.5	6.5		27.1	8.1	26.9	7.9	
< 0,09	6.7		6.5			8.1		7.9		
Σ	100	112.9	100	109.7		100	120.9	100	119.6	
A _{KM}		11.0		9.9	10.5		13.6		13.2	13.4

Fläche P5 Straßenrand MP3 unbelastet (I, II und III) und belastet (IV und V)

	I		II		III		Mittel	IV		V		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	R	D	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	25.3	74.7	29.3	70.7	26.6	73.4		27.4	72.6	25.7	44.3	
0,25	40.8	33.9	39.5	31.2	40.1	33.3		39.3	33.3	40.8	33.5	
0,09	28.1	5.8	25.3	5.9	27.1	6.2		27.4	5.9	27.3	6.2	
< 0,09	5.8		5.9		6.2			5.9		6.2		
Σ	100	114.4	100	107.8	100	112.9		100	111.8	100	84.0	
A _{KM}		11.5		9.3		11.0	10.6		10.6		11.3	10.9

Fläche N1 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	31.80	68.20	32.32	67.68		31.60	68.40	31.32	68.68	
0,25	35.44	32.76	34.99	32.69		36.83	31.57	37.75	30.93	
0,09	25.53	7.23	25.09	7.60		24.37	7.20	24.09	6.84	
< 0,09	7.23		7.60			7.20		6.84		
Σ	100	108.19	100	107.97		100	107.17	100	106.45	
A _{KM}		9.4		9.32	9.4		9.06		8.82	8.9

R = Rückstand D = Durchgang

Fläche N2 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	26.0	74.0	23.2	76.8		25.7	24.3	25.8	74.2	
0,25	40.1	33.9	43.9	32.9		39.7	34.6	40.0	34.2	
0,09	28.2	5.7	27.4	5.5		28.3	6.3	28.3	5.9	
< 0,09	5.7		5.5			6.3		5.9		
Σ	100	113.6	100	115.2		100	65.2	100	114.3	
A _{KM}		11.2		11.7	11.5		11.3		11.4	11.4

Fläche N2 Busspur belastet (III und IV)

	III		IV		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	22.5	77.5	22.4	77.6	
0,25	42.8	34.7	42.7	34.9	
0,09	28.8	5.9	29.0	5.9	
< 0,09	5.9		5.9		
Σ	100	118.1	100	118.4	
A _{KM}		12.7		12.8	12.8

Fläche N3 unbelastet (I und II) und belastet (III und IV)

	I		II		Mittel	III		IV		Mittel
Siebgröße	R	D	R	D	D	R	D	R	D	D
[mm]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
0,71	23.4	76.6	21.0	79.0		24.5	75.5	23.7	76.3	
0,25	33.0	43.6	34.2	44.8		36.1	39.4	36.0	40.3	
0,09	30.6	13.0	32.1	12.7		28.1	11.3	28.2	12.1	
< 0,09	13.0		12.7			11.3		12.1		
Σ	100	133.2	100	136.5		100	126.2	100	128.7	
A _{KM}		17.7		18.8	18.3		15.4		16.2	15.8

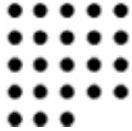
R = Rückstand D = Durchgang

**Micro-Deval-Verfahren nach DIN EN 1097-1 (Prüfkörnung: 10/14 mm) und
Los Angeles-Verfahren nach DIN EN 1097-2 (Prüfkörnung: 10/14 mm)**

Material	Micro-Deval-Verfahren			Los Angeles-Verfahren		
	I	II	Δ	I	II	Δ
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
K 1	14,7	14,7	0,0	24,0	24,4	0,4
K 2	9,7	9,6	0,1	26,7	26,2	0,5
K 3	17,4	16,9	0,5	19,4	19,3	0,1
K 4	17,1	-	-	26,5	27,2	0,7
GW 5	15,0	18,1	3,1	11,8	12,2	0,4
GW 6	8,4	9,2	0,8	10,8	10,9	0,1
GW 7	17,3	17,0	0,3	10,4	10,3	0,1
D 8	14,2	14,3	0,1	9,8	9,5	0,3
D 9	27,3	28,3	1,0	13,9	14,3	0,4
B 10	7,0	7,6	0,6	13,4	13,6	0,2
B 11	14,8	14,6	0,2	13,8	14,0	0,2
GR 12	6,2	6,9	0,7	19,8	20,4	0,6
GR 13	6,3	6,2	0,1	21,0	21,6	0,6
RHY 14	7,7	7,3	0,4	13,1	13,4	0,3
RHY 15	22,6	22,4	0,2	14,4	14,7	0,3
Q 16	5,6	6,2	0,6	17,3	17,1	0,2
Q 17	7,9	7,4	0,5	19,2	18,8	0,4
GN 18	18,2	17,4	0,8	19,7	19,7	0,0
OGN 19	18,7	19,9	1,2	17,6	18,1	0,5
BS 20	6,4	6,5	0,1	13,0	12,4	0,6
RCTL 21	12,4	11,9	0,5	36,4	36,7	0,3
RCZ 22	5,5	5,6	0,1	12,3	11,9	0,4
RCB 23	7,6	8,4	0,8	25,3	-	-
SKG 24	15,8	15,4	0,4	33,1	33,7	0,6
HS 25	15,6	12,9	2,7	22,6	-	-
LDS 26	14,7	14,7	0,0	24,0	24,4	0,4
NS 27	9,7	9,6	0,1	26,7	26,2	0,5
NS 28	17,4	16,9	0,5	19,4	19,3	0,1
NS 29	17,1	-	-	26,5	27,2	0,7

Bewertungshintergrund: Fragebogen


RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

 Lehrstuhl für Verkehrswegebau
 Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg

Fachhochschule Köln

 Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser
 Prof. Dr.-Ing. Carsten Koch

Fragebogen zur Erfassung baupraktischer Erfahrungen mit Schäden an Pflasterschäden

**AiF-Vorhaben Nr. 13938: „Entwicklung eines Verfahrens zur Prüfung und Bewertung
des Abriebwiderstandes von Bettungs- und Fugenmaterialien von
Pflasterbefestigungen“**

An höher belasteten Pflasterflächen wurden häufig Schäden festgestellt, die auf die Verwendung von Bettungs- und Fugenmaterialien mit geringem Abriebwiderstand zurückgeführt werden konnten. Die durch Verkehrslasten entstehenden Abriebkräfte können zu einer Anreicherung von Feinkorn in der Bettung führen, wodurch die Wasserdurchlässigkeit beeinträchtigt wird. Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens ist u. a. die Sammlung von baupraktischen Erfahrungen als Grundlage zur Festlegung von Anforderungswerten erforderlich. Im Rahmen der Untersuchungen sollen nur Pflasterflächen mit regelmäßiger Verkehrsbelastung, Betonpflastersteinen und ungebundenem Bettungsmaterial betrachtet werden.

Bitte beantworten Sie folgende Fragen:

Erfahrungen mit Schadensfällen

1. Haben Sie festgestellt, dass eine zu geringe Wasserdurchlässigkeit der Bettung ursächlich für die Entwicklung von Schäden an der Pflasterdecke war?

- a. Welchen Anteil an der gesamten Anzahl der von Ihnen untersuchten Schäden nimmt die Ursache „mangelnde Wasserdurchlässigkeit“ ein?

weniger als 10 %	mehr als 10 % und weniger als 50 %	mehr als 50 % und weniger als 80 %	mehr als 80 %
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. Haben Sie festgestellt, dass die Kornverfeinerung / der Abrieb von Bettungs- oder Fugenmaterial ursächlich für die Entwicklung dieser Schäden war?

Wenn ja:

- a. Können Sie hierzu stichwortartig Beispiele benennen?

- b. Welchen Anteil an der gesamten Anzahl der von Ihnen untersuchten Schäden nimmt die Ursache „mangelnder Abriebwiderstand“ ein?

weniger als 10 %	mehr als 10 % und weniger als 50 %	mehr als 50 % und weniger als 80 %	mehr als 80 %
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

c. Welches Schadensbild wurde in solchen Fällen beobachtet?

3. Wie zeigte sich der Abrieb / die Kornverfeinerung von Bettungs- und Fugenmaterial?

a. Wurde eine Anreicherung von Feinkorn an der Oberfläche der Bettungsschicht festgestellt?

ja	nein	nicht untersucht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

b. Wurde im Zusammenhang mit Schäden durch mangelnden Abriebwiderstand eine Herabsetzung der Wasserdurchlässigkeit beobachtet?

ja	nein	nicht untersucht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

c. Sonstige Beobachtungen?

4. Welche Baustoffgemische wurden verwendet?

	Gesteinsart		Körnung
Bettungsmaterial:			
Fugenmaterial:			

5. Wurden Laboruntersuchungen zur Beurteilung des Schadens und der verwendeten Materialien durchgeführt?

Wenn ja:

- a. Welche Laboruntersuchungen wurden durchgeführt?

- b. Wurde bei der Untersuchung des Bettungs- und Fugenmaterials eine Veränderung der ursprünglichen Korngrößenverteilung festgestellt?

ja	nein	nicht untersucht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- c. Welchen Schlagzertrümmerungswert wies die Gesteinsart auf (ggf. Splitt-Kennwerte des Herstellers)?

<input type="text"/>	nicht untersucht
..... %	<input type="checkbox"/>

6. Welche Anforderungen an die mechanische Festigkeit berücksichtigen Sie bzw. würden Sie bei der Auswahl von Bettungs- und Fugenmaterial vorschlagen?
