

Anforderungen an das Bettungs- und Fugenmaterial für Pflasterdecken bei statischer und dynamischer Verkehrsbeanspruchung

FA 6.078

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau
(Prof. Dr.-Ing. K. Krass)

Bearbeiter: Görener, E.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Mai 2005

1. Einleitung

In der Praxis hat sich gezeigt, dass es trotz Einhaltung der Filterkriterien gemäß den ZTV P-StB 2000 [1] zu einem Abwandern des Fugenmaterials in die Bettung kommen kann. Vermutet wird, dass durch die kombinierte Belastung aus Beregnung und Vibration eine Abwanderung des Fugenmaterials begünstigt wird. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde dieser Zusammenhang untersucht.

2. Untersuchungsmethodik

2.1 Versuchsapparatur

Um das Verhalten unterschiedlicher Fugenmaterialien bezogen auf ihre Filterstabilität untersuchen zu können, wurden zwei Versuchsapparaturen entwickelt.

Beide Apparaturen wurden folgenden Belastungen ausgesetzt:

- reine Strömungsbeanspruchung,
- Vibration am trockenen Fugenmaterial,
- Vibration am feuchten Fugenmaterial,
- kombinierte Belastung aus Vibration und Beregnung.

2.2 Voruntersuchungen

Für die Voruntersuchungen wurde eine modellhafte Nachbildung der Pflasterdecke konstruiert, die eine einfache Entnahme des Fugenmaterials nach Versuchsdurchführung ermöglichte. (Apparatur Bild 1)

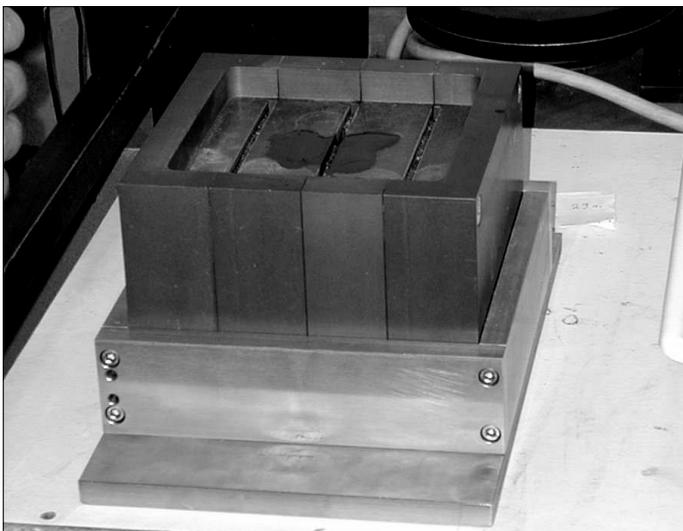


Bild 1: Versuchsapparatur, bestehend aus einem Aluminiumblock mit eingefrästen 5 mm breiten Fugen



Bild 2: Versuchsapparatur mit regelkonform verlegten Pflastersteinen

Die Versuchsapparatur besteht aus einem Aluminiumblock mit eingearbeiteten Fugen von 5 mm Breite, einem Edelstahlrahmen und einer Edelstahlplatte an der Unterseite. Das Bettungsmaterial wird in den Rahmen eingebaut und der Aluminiumblock aufgesetzt.

Anschließend werden die Fugen mit Fugenmaterial gefüllt und das gesamte System der entsprechenden Belastung ausgesetzt. Nach Ausbau des Fugenmaterials konnte dieses analysiert werden.

2.3 Hauptuntersuchungen

Die Hauptuntersuchungen wurden an Pflasterdecken durchgeführt. Sie gliedern sich in Untersuchungen an Pflasterdecken unter definierter dynamischer Belastung sowie unter Belastung mit rollendem Rad. Für die Untersuchungen wurden Pflastersteine verwendet, die keine Fase und Abstandhalter hatten. Ziel der Untersuchungen war die Auswirkungen der Beanspruchungen an regelkonform verlegten Pflastersteinen zu beschreiben. Für die Durchführung dieser Untersuchungen war es erforderlich, eine Versuchsapparatur zu konstruieren, in die Pflastersteine eingebaut werden konnten (Bild 2).

Nach der Belastung wurde das Fugenmaterial ausgebaut und analysiert.

3. Untersuchungsmaterialien

Als Untersuchungsmaterialien wurden Diabas (DB), Kalkstein (KS) und Natursand (NS) bzw. ein Sand-Kies-Gemisch (SK) ausgewählt. Diese wurden sowohl als Bettungs- als auch als Fugenmaterial verwendet. In Tabelle 1 sind die verwendeten Bettungs- (BM) und Fugenmaterialien (FM) näher gekennzeichnet. Die Kennzeichnung des Fugenmaterials erfolgt über die Angaben fein, mittel und grob, wobei fein bedeutet, dass sich die Korngrößenverteilung des Fugenmaterials dem Grenzwert der Filterregel nähert, und grob, dass sie sich der Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials annähert. Je Gesteinsart wurden vier unterschiedliche Bettungsmaterialien definiert. Das Bettungsmaterial BM I besteht beim gebrochenen Material aus

der Körnung 2/5 mm und beim Rundkorn aus der Körnung 2/4 mm.

Die Bettungsmaterialien BM II bis BM IV wurden aus der Körnung 0/5 mm beim Diabas und beim Kalkstein und der Körnung 0/4 mm beim Sand-Kies-Gemisch zusammengesetzt. Sie unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung im Füllergehalt. In Bild 3 ist die Korngrößenverteilung der Fugenmaterialien IA, IB und IC abgebildet. Die Grenzwerte für die Sieblinienbereiche der Fugenmaterialien zur Einhaltung der Filterkriterien wurden ausgehend von der Zusammensetzung des Bettungsmaterials aufgestellt. Zielsetzung war es, bei allen Bettungsmaterialien den gleichen Sieblinienverlauf der Fugenmaterialien zu ermöglichen, um später auch den Einfluss der Bettungsmaterialien untersuchen zu können. Als Filterkriterien wurden die gemäß den ZTV P-StB 2000 benannten Kriterien verwendet.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Der Verlust an Fugenmaterial in den Voruntersuchungen war insgesamt sehr gering. Jedoch konnte bereits hier eindeutig die Tendenz erkannt werden, dass erst die Kombination aus Beregnung und Vibration zu einem merklichen Verlust an Fugenmaterial führte. Bei einer Beanspruchung aus Beregnung oder nur Vibration waren nahezu keine Verluste an Fugenmaterial zu beobachten. Am Beispiel des Natursandes ist dieser Zusammenhang in Bild 4 dargestellt.

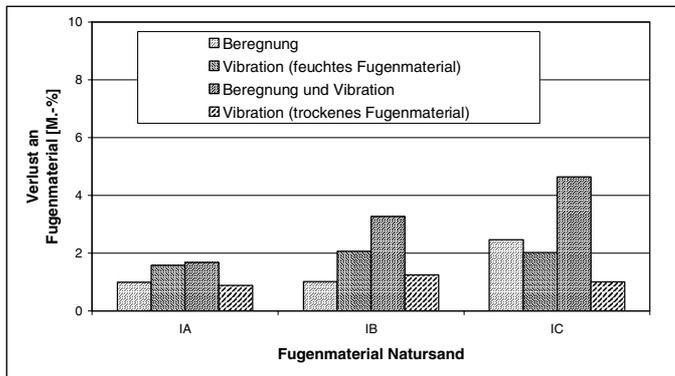


Bild 3: Verlust an Fugenmaterial in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Fugenmaterials und der Belastungsart bei der Verwendung eines Sand-Kies-Gemischs 0/4 mm mit 6 M.-% Füller als Bettungsmaterial

Bei der Betrachtung der einzelnen Kornklassen (Tabelle 2) konnte der Vorgang der Suffosion eindeutig festgestellt werden. Mit größer werdendem Fugenmaterial nimmt in der Kornklasse < 0,09 mm der Verlust, bedingt durch Suffosion, zu. In den anderen Kornklassen sind die Veränderungen dermaßen gering, dass keine Tendenzen erkannt werden konnten. Der Verlust an Fugenmaterial in der Kornklasse < 0,09 macht sich ebenfalls in dem Gesamtverlust bemerkbar. Wie der Tabelle 2 entnommen werden kann, nehmen die Verluste mit größer werdendem Fugenmaterial zu.

4.2 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen

Die in den Hauptuntersuchungen ermittelten Gesamtverluste an Fugenmaterial sind höher als in den Voruntersuchungen. Der Verlust an Fugenmaterial in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Fugenmaterials aus Diabas und der Belastungsart bei

der Verwendung von Diabas 0/5 mm mit 9 M.-% Füller als Bettungsmaterial ist in Bild 5 beispielhaft dargestellt.

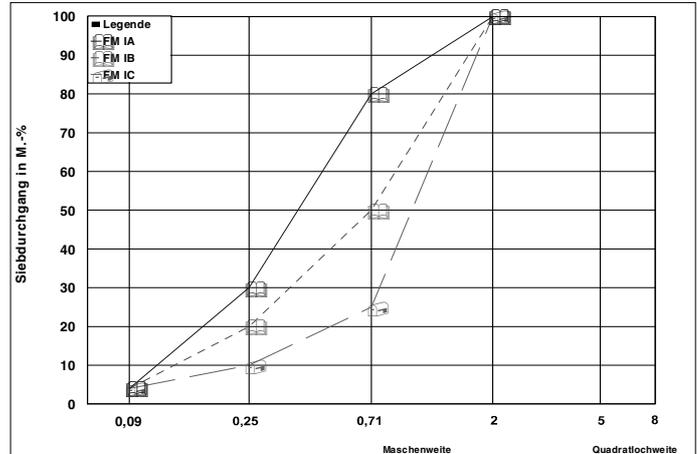


Bild 4: Korngrößenverteilung der Fugenmaterialien FM IA, FM IB und FM IC

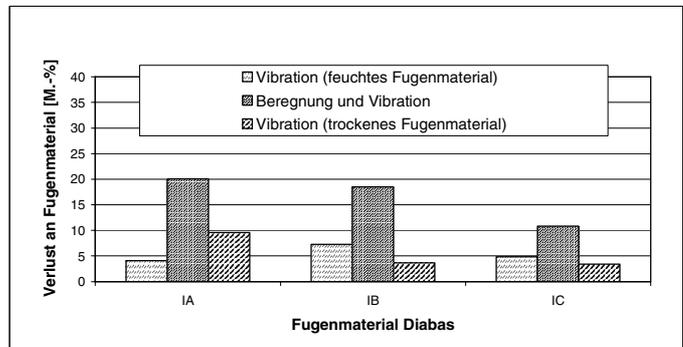


Bild 5: Verlust an Fugenmaterial in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Fugenmaterials aus Diabas und der Belastungsart bei der Verwendung von Diabas 0/5 mm mit 9 M.-% Füller als Bettungsmaterial

Wie der Abbildung entnommen werden kann, tritt auch bei den Hauptuntersuchungen der höchste Verlust an Fugenmaterial bei einer kombinierten Belastung aus Beregnung und Vibration auf.

In der Tabelle 3 sind die Verluste an Fugenmaterial aus Diabas infolge der Belastung durch Beregnung und Vibration in Abhängigkeit von der Kornklasse und der Gesamtverlust abgebildet.

In den Kornklassen < 0,09 mm, 0,09/0,25 mm und 0,25/0,71 mm sind eindeutige Tendenzen und Unterschiede in dem Verhalten der Fugenmaterialien zu erkennen. In der Kornklasse < 0,09 mm findet bei allen Untersuchungen eine Abnahme der Kornanteile statt.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass mit größer werdendem Fugenmaterial eine deutliche Zunahme des Verlustes an Fugenmaterial in der Kornklasse < 0,09 mm stattfindet. Durch die grobe Zusammensetzung des Fugenmaterials FM IC wird der Vorgang der Suffosion begünstigt, was die hohen Verluste erklärt.

In der Kornklasse 0,09/0,25 mm werden hohe Verluste beim Fugenmaterial FM IA gemessen. Diese resultieren aus der extrem feinen Zusammensetzung des Materials, welches sich in dieser Kornklasse als ungünstig für die Filterstabilität erweist. Bei der Betrachtung der Kornklasse 0,25/0,71 mm wird deutlich, dass die gleiche Tendenz wie in der Kornklasse 0,09/0,25 mm zu beobachten ist. Mit größer werdendem Fugenmaterial neh-

men die Verluste ab. Der Gesamtverlust setzt sich aus der Summe der Verluste aus den einzelnen Kornklassen zusammen. Wie der Tabelle 3 zu entnehmen ist, nehmen die Gesamtverluste mit gröber werdendem Fugenmaterial ab.

4.3 Verhalten unter Belastung des rollenden Rades

Im zweiten Teil der Hauptuntersuchungen wurden Versuche in der Straßenprüfmaschine durchgeführt. Hier wurden zwei Prüffelder untersucht, bei denen ein Diabas und ein Sand-Kies-Gemisch als Bettungsmaterial verwendet wurden. Aufgrund der Größe des Feldes konnten je Versuchsfeld drei Fugenmaterialien eingebaut werden. Folglich konnten sechs unterschiedliche Fugenmaterialien (Natursand: FM IA, IB und IC / Diabas: FM IA, IB und IC) bei zwei verschiedenen Bettungsmaterialien untersucht werden. Als Bettungsmaterial wurden ein Diabas 0/5 mm mit 3 M.-% Füller und ein Sand-Kies-Gemisch 0/4 mm mit 3 M.-% Füller gewählt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigen teilweise die bisher dargestellten Ergebnisse. Jedoch ist die Geschwindigkeit von 1,5 m/s bzw. 5,4 km/h zu gering, um Schwingungen in die Pflasterfläche einzuleiten, die eventuell eine Kornumlagerung und somit ein Abwandern in die Bettung bewirken können. Vermutlich würde eine schnellere Überrollung zu höheren Verlusten an Fugenmaterialien führen, da bereits mit dieser geringen Geschwindigkeit das in den Hauptuntersuchungen ermittelte Verhalten teilweise bestätigt wurde.

5. Schlussfolgerungen

5.1 Vorschlag zur Verbesserung der Filterstabilität

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen lässt sich ableiten, dass es bei einer groben Zusammensetzung des Fugenmaterials zu einer Suffosion kommt und die Feinanteile einfacher aus dem Fugenmaterial in die Bettung eingespült werden können. Dies zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung der Kornklasse $< 0,09$ mm, wo deutlich wird, dass je gröber das Fugenmaterial, desto höher der Verlust in dieser Kornklasse ist. Um diesem Vorgang vorzubeugen, ist es erforderlich, beim Fugenmaterial eine zu grobe Zusammensetzung zu unterbinden. Dies ist möglich, indem zusätzlich ein Kriterium eingeführt wird, wodurch eine Mindestkorngröße bei einem Durchgang von 15 M.-% gefordert wird. Daher sollte darauf geachtet werden, dass das Fugenmaterial hier nicht gröber ist als das Bettungsmaterial, da ansonsten sowohl das benannte Problem der Suffosion als auch ein Wasserstau erfolgen können. Um diese Problematik zu vermeiden, scheint es sinnvoll, die Filterkriterien in [1] um die hydraulische Wirksamkeit in Anlehnung an Terzaghi zu ergänzen. Die hydraulische Wirksamkeit gemäß [2] wird eingehalten, wenn das Kriterium $D15/d15 \geq 4$ erfüllt wird. Zweckmäßig sollte für die Pflasterbauweise das Kriterium $D15/d15 \geq 1$ verwendet werden, um auch einen gleichen Sieblinienverlauf für Bettungs- und Fugenmaterial zu ermöglichen.

Wie aus den Untersuchungsergebnissen hervorgeht, sind in der Kornklasse 0,09/0,25 und 0,25/0,71 mm die höchsten Verluste beim Fugenmaterial FM IA festgestellt worden. Auch bei der Beanspruchung unter rollendem Rad hat sich nur beim Natursand gezeigt, dass hier eine Abwanderung zu beobachten ist und das trotz niedriger Überrollungsgeschwindigkeit. Das in [1] formulierte Abstandsverhältnis $D50/d50 \leq 10$ ist somit für die kombinierte Beanspruchung aus Beregnung und Vibration zu großzügig formuliert und führt, wie gesehen, zu hohen Verlusten an Fugenmaterial. Demnach sollte das Verhältnis auf $D50/d50 \leq 5$ reduziert werden.

Das Bettungsmaterial kann gemäß [1] mit einem Füllergehalt von 6 ± 3 M.-% ausgeführt werden. Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass bei einer Verwendung der Bettung

BM IV, also ein Bettungsmaterial mit einem Füllergehalt von 9 M.-%, tendenziell höhere Verluste an Fugenmaterial ermittelt wurden als bei den anderen Bettungsmaterialien. Durch den hohen Füllergehalt können größere Hohlräume in der Bettung entstehen, wenn der Füller aus der Bettung ausgespült wird. Im Versuchsstand konnte dies durch die Austrittsöffnungen an der unteren Platte geschehen. In situ ist dieser Vorgang möglich, falls die Filterstabilität zwischen Tragschicht- und Bettungsmaterial nicht gegeben ist. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, den in [1] vorgegebenen Füllergehalt beim Bettungsmaterial auf 5 ± 2 M.-% zu verringern. So kann gewährleistet werden, dass beim Ausspülen der Feinanteile aus dem Bettungsmaterial die entstehenden Hohlräume gering bleiben.

Zusammenfassend kann die Filterregel für die Zusammensetzung des Fugenmaterials in Abhängigkeit vom Bettungsmaterial wie folgt formuliert werden:

Der Nachweis der Filterstabilität gilt als erbracht, wenn die Bedingungen:

$$D15/d85 \leq 4, D50/d50 \leq 5 \text{ und } D15/d15 \geq 1$$

erfüllt werden.

5.2 Zusammenfassung

Hauptziel der Forschungsarbeit war es, die Auswirkungen aus der dynamischen Beanspruchungen der Pflasterdecke auf die Filterstabilität zu untersuchen. Hierzu wurden in den Vor- und Hauptuntersuchungen die Bettungs- und Fugenmaterialien unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Beanspruchungen der Pflasterfläche auf das Verhalten von Bettungs- und Fugenmaterial zu erfassen, wurden diese getrennt voneinander und in Kombination untersucht.

Es zeichnete sich bereits in den Voruntersuchungen die Tendenz ab, dass erst eine Kombination der Beanspruchung durch Beregnung und Vibration zu einem merklichen Verlust an Fugenmaterial führte. Die Untersuchungsergebnisse der Hauptuntersuchungen haben diese Beobachtung bestätigt. So wurden auch hier die höchsten Verluste an Fugenmaterial bei der kombinierten Beanspruchung erfasst. Die alleinige Beanspruchung aus Beregnung führte zu keinem merklichen Verlust an Fugenmaterial. Bei der Belastung durch Vibration bei feuchtem Fugenmaterial waren die Verluste an Fugenmaterial zwar etwas höher, jedoch nicht so gravierend wie bei der kombinierten Beanspruchung. Die Verwendung eines trockenen Fugenmaterials führte infolge der Beanspruchung aus Vibration zwar zu einem Verlust an Fugenmaterial, jedoch waren diese ebenfalls sehr gering, und es kam hauptsächlich zu einem Vermischen der Bettungs- und Fugenmaterialien.

Die Ergebnisse zeigen ein positives Filterverhalten des Natursandes in den Laboruntersuchungen. Hier waren die erfassten Verluste an Fugenmaterial deutlich geringer als bei den Brechsand. Bei der Belastung des rollenden Rades hat sich gezeigt, dass das Fugenmaterial aus Natursand eher ungünstig zu bewerten ist, da es zu Kornzertrümmerung und zu einer, wenn auch geringen, Abwanderung gekommen ist.

Es hat sich gezeigt, dass ein hoher Anteil der Kornklasse 0,25/0,71 mm im Ausgangsmaterial zu einem merklichen Verlust an Fugenmaterial führt. Weiterhin wird durch eine grobe Zusammensetzung des Fugenmaterials der Vorgang der Suffosion begünstigt. Dies zeigte sich insbesondere beim Fugenmaterial FM IC (grobe Zusammensetzung).

Basierend auf den Ergebnissen konnte ein Laborverfahren zur Bestimmung der Filterstabilität bei Pflasterbelägen formuliert werden. Der Versuchsaufbau der Hauptuntersuchungen hat sich als günstig erwiesen, da hier die Verluste an Fugenmaterial hö-

her waren als bei den Voruntersuchungen und somit Unterschiede in dem Verhalten der Materialien deutlicher zutage traten.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse konnten Vorschläge zur Verbesserung der Filterstabilität gemacht werden, die in die einschlägigen Regelwerke aufgenommen werden sollten.

Literaturverzeichnis

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen ZTV P-StB 2000, Ausgabe 2000, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- [2] Terzaghi, K.; Peck, R. B.: Die Bodenmechanik in der Bau- praxis, New York, John Wiley and Sons, 1948

Tabelle 1: Kennzeichnung der Bettungs- und Fugenmaterialien

Bezeichnung	Material		
	Diabas	Kalkstein	Sand-Kies / Natursand
BM I	DB 2/5 mm	KS 2/5 mm	Kies 2/4 mm
FM IA	DB, fein	KS, fein	NS, fein
FM IB	DB, mittel	KS, mittel	NS, mittel
FM IC	DB, grob	KS, grob	NS, grob
BM II	DB 0/5 mm; 3 M.-% < 0,09 mm	KS 0/5 mm; 3 M.-% < 0,09 mm	SK 0/4 mm; 3 M.-% < 0,09 mm
FM IA	DB, fein	KS, fein	NS, fein
FM IB	DB, mittel	KS, mittel	NS, mittel
FM IC	DB, grob	KS, grob	NS, grob
BM III	DB 0/5 mm; 6 M.-% < 0,09 mm	KS 0/5 mm; 6 M.-% < 0,09 mm	SK 0/4 mm; 6 M.-% < 0,09 mm
FM IA	DB, fein	KS, fein	NS, fein
FM IB	DB, mittel	KS, mittel	NS, mittel
FM IC	DB, grob	KS, grob	NS, grob
BM IV	DB 0/5 mm; 9 M.-% < 0,09 mm	KS 0/5 mm; 9 M.-% < 0,09 mm	SK 0/4 mm; 9 M.-% < 0,09 mm
FM IA	DB, fein	KS, fein	NS, fein
FM IB	DB, mittel	KS, mittel	NS, mittel
FM IC	DB, grob	KS, grob	NS, grob

Tabelle 2: Verlust an Fugenmaterial aus Natursand infolge der Belastung aus Beregnung und Vibration in Abhängigkeit von der Kornklasse, Gesamtverlust und Änderung des Feinheitsgrades

Versuch-Nr.	FM	Bettung	Verlust an Fugenmaterial in Abhängigkeit von der Kornklasse [mm]				Gesamt-verlust [M.-%]	Änderung Feinheitsgrad [-]
			< 0,09	0,09/0,25	0,25/0,71	0,71/2		
			[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]		
3 b V	IA	BM I	0,77	0,22	2,10	-1,42	1,68	1,0
7 b V	IB		2,34	0,39	1,31	-0,77	3,26	2,3
11 b V	IC		3,06	0,35	0,48	0,76	4,64	3,0
15 b V	IA	BM II	1,29	0,52	0,25	-0,86	1,20	1,3
19 b V	IB		1,95	-0,14	0,48	0,01	2,30	1,5
23 b V	IC		3,25	0,07	-0,27	0,70	3,76	2,8
27 b V	IA	BM III	1,01	0,46	0,13	-0,89	0,71	1,1
31 b V	IB		1,88	0,38	0,29	-0,40	2,16	1,7
35 b V	IC		2,99	0,20	-0,06	0,59	3,72	2,7
39 b V	IA	BM IV	1,47	0,69	0,55	-0,54	2,17	1,3
43 b V	IB		1,26	0,02	0,28	0,37	1,93	0,9
47 b V	IC		3,41	0,84	0,76	8,08	13,09	2,9

Tabelle 3: Verlust an Fugenmaterial aus Diabas infolge der Belastung durch Beregnung und Vibration in Abhängigkeit von der Kornklasse, Gesamtverlust und Änderung des Feinheitsgrades

Versuch Nr.	FM	BM	Verlust an Fugenmaterial in Abhängigkeit von der Kornklasse [mm]				Gesamt- verlust [M.-%]	Änderung Feinheitsgrad [-]
			< 0,09	0,09/0,25	0,25/0,71	0,71/2		
			[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]		
3 a H	IA	BM I	1,2	7,5	16,5	5,9	31,1	-0,2
7 a H	IB		0,6	0,8	3,3	6,0	10,7	-0,4
11 a H	IC		1,5	0,9	3,1	4,1	9,6	2,1
15 a H	IA	BM II	1,4	5,2	9,9	4,4	20,9	0,3
19 a H	IB		2,7	3,1	5,6	7,1	18,5	2,5
23 a H	IC		3,4	1,5	-2,0	5,9	8,9	2,9
27 a H	IA	BM III	0,4	3,9	5,5	2,8	12,6	0,1
31 a H	IB		1,3	2,5	4,1	5,5	13,4	1,2
35 a H	IC		2,2	-0,6	-1,7	10,1	9,9	-0,1
39 a H	IA	BM IV	0,7	1,9	10,5	6,9	20,0	-2,6
43 a H	IB		1,1	1,3	3,9	12,2	18,5	-1,6
47 a H	IC		2,8	0,5	0,2	7,4	10,8	2,0