

# Einflüsse auf die Verfestigungsneigung von Fugen- und Bettungsmaterialien – Erkenntnisse aus neuester Forschung

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass Fugen- und Bettungsmaterialien aufgrund der Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit der Unterlage der Pflasterdecke nicht selten ursächlich für Schäden an ungebundenen Pflasterdecken waren. Im Rahmen eines durch die FGSV finanzierten Forschungsvorhabens zeigte sich, dass einige in der Praxis eingesetzte Fugen- und Bettungsmaterialien aufgrund zu hoher Feinanteile  $< 0,125$  mm im Anlieferungszustand bzw. aufgrund der Kornverfeinerung der Materialien aufgrund zu geringer Kornfestigkeiten zur Verfestigung und damit auch zur Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit der Bettung neigen. Diese Verfestigung beginnt im Normalfall unter den Fugen und schreitet von hier aus in Richtung Steinmitte voran. Besonders häufig treten diese Schäden bei intensiver genutzten Pflasterdecken auf. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Ergebnisse werden soweit möglich in das zu überarbeitende FGSV-Regelwerk wie z. B. die TL Pflaster-StB oder die ZTV Pflaster-StB übernommen.

[doi.org/10.53184/STA8-2025-4](https://doi.org/10.53184/STA8-2025-4)

## 1 Einleitung

### 1.1 Sachstand und Ziele des Forschungsvorhabens

Mit Pflastersteinen und Plattenbelägen werden in Deutschland ca. 50 % aller kommunalen Verkehrsflächen befestigt. Diese Bauweise gewinnt mit weitergehender Priorisierung der Nachhaltigkeit sowie mit dem erklärten Ziel verstärkter Entsiegelung von Verkehrsflächen zur Klimafolgendämpfung weiter an Bedeutung.

Zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit der Flächenbefestigungen sind Bettungs- und Fugenmaterialien erforderlich, die auch langfristig eine ausreichende mechanische Festigkeit, Verformungsstabilität und Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Zusätzlich dürfen sie nicht verfestigen und somit die Wasserdurchlässigkeit der Konstruktion herabsetzen. Hierzu sind die Bettungs- und Fugenmaterialien u. a. hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, ihrer Materialeigenschaften und hier im Besonderen hinsichtlich ihrer dauerhaften Wasserdurchlässigkeit zu optimieren. Da die Wasserdurchlässigkeit

der Bettungsmaterialien wesentlich durch die Menge an Feinanteilen beeinflusst wird, spielt im Besonderen die Verfeinerung der Materialien aufgrund einer zu geringen Kornfestigkeit eine entscheidende Rolle, wenn die Wasserdurchlässigkeit der Unterlage optimiert werden soll.

Das FGSV-Regelwerk enthält im Gegensatz zu den aktuellen ZTV Wegebau der Forschungsgesellschaft Landschaftsbau, Landschaftsentwicklung (FLL) mit Ausnahme des Merkblatts für Großformate (MF G) keine konkreten Anforderungen an die Kornfestigkeit der Bettungs- und Fugenmaterialien. Stattdessen wird die Kornfestigkeit der Bettungs- und Fugenmaterialien im FGSV-Regelwerk aktuell nur an der Grobkörnung aus demselben Vorkommen überprüft und auf die feineren Gesteinskörnungen übertragen. Aus diesem Grunde sind die Anforderungen an Fugen- und Bettungsmaterialien

z. B. in den aktuellen ZTV Pflaster-StB nur wachsw weich. So müssen diese Materialien aktuell „nur“ eine ausreichende Festigkeit besitzen.

Dies musste so formuliert werden, da die Bestimmung des Schlagzertrümmerungswerts oder des Los-Angeles-Koeffizienten



Bild 1: Nicht ausreichend wasserdurchlässige Bettung einer Pflasterdecke

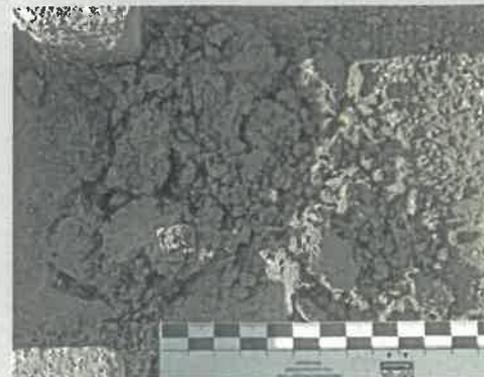


Bild 2: „Mörtelähnliche Schicht“ in der Oberfläche der Bettung

#### ■ Verfasser

Dr. rer. nat. Karl-Uwe Voß  
voss@mpva.de

Materialprüfungs- und Versuchsanstalt  
Neuwied GmbH  
Sandkauler Weg 1  
56564 Neuwied

Experience has shown that joint and laying course materials have in the past sometimes been the cause of damage to unbound block pavements as a result of the reduction in water permeability of the block pavement base. A research project funded by the Road and Transportation Research Association (FGSV) has shown that some of the joint and laying course materials used tend to harden as a result of an excessively high proportion of fine aggregate (< 0.125 mm) in its delivered state and/or as a result of the reduction in the size of aggregate due to inadequate aggregate strength, thereby leading to a reduction in water permeability of the laying course. This hardening generally begins beneath the joints, spreading from there towards the centre of the stone. Such damage occurs particularly often in intensively used block pavements. The findings of this research project will, where possible, be included in the revision of relevant FGSV technical standards and specifications, e. g. the Technical delivery terms for construction products used in the construction of block pavements, slab pavements, and edgings (TL Pflaster-StB) or the Additional technical conditions of contract and directives for the construction of block pavements, slab pavements, and edgings (ZTV Pflaster-StB).

nicht die Untersuchung von Gesteinskörnern < 10 mm vorsieht. Weitergehende Anforderungen z. B. an die Verfestigungsneigung der Bettungs- und Fugenmaterialien sind im Regelwerk der FGSV bislang nicht enthalten.

Auch hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit der Bettung enthält das FGSV-Regelwerk bislang nur die Anforderung, dass die Bettung „ausreichend wasserdurchlässig“ sein muss, da genauere Untersuchungen hierzu (insbesondere zum Langzeitverhalten der Materialien) fehlen.

In der Praxis erfolgt die Auswahl geeigneter Bettungs- und Fugenmaterialien demnach allein auf Basis von Erfahrungswerten, so dass eine große Anzahl an Schäden in Objekten vorgefunden wird, wenn die eingesetzten Gesteinskörnungen unzureichende Materialeigenschaften (Kornfestigkeit, Verfestigungsneigung oder Wasserdurchlässigkeit) aufweisen. Aufgrund der in der Praxis häufig vorgefundenen Verfestigung der Bettung von Pflasterdecken (Bild 1) geraten besonders die Bettungsmaterialien immer stärker in den Fokus der Forschung.

Werden derartige Pflasterdecken geöffnet, so wird unter den Pflastersteinen in vielen Fällen eine „mörtelähnliche Schicht“ vorgefunden (Bild 2), obwohl ungebundene Bettungsmaterialien zur Herstellung der Pflasterdecke eingesetzt worden waren.

In der Oberfläche der Pflasterdecke äußern sich diese „Verfestigungen“ im Normalfall durch einen oder mehrere der nachfolgend genannten und in [L 9] beschriebenen Folgeschäden:

- Verschiebung der Pflastersteine (Bild 3),
- Bildung von Spurrinnen (Bild 3),
- Entstehung von Kantenabplatzungen (Bild 4) oder
- Bildung von Ausblühungen.

Werden diese Schäden durch eine mangelhafte Entwässerungsfähigkeit der Bettung

verursacht, so sind sie nur durch kostenintensive Schadensbeseitigungsmaßnahmen (Vollaustausch der Pflasterdecke inkl. der vorhandenen Bettung) zu beseitigen.

Weder der genaue Schadensmechanismus noch die für die „Abdichtung der Bettung“ wesentlichen Einflüsse sind derzeit ausreichend untersucht. Aus diesem Grunde bestand das Ziel des durch die FGSV geförderten Forschungsprojekts darin, Grundlagen zur quantitativen Bewertung der langfristigen Eigenschaften von Fugen- und Bettungsmaterialien zu erarbeiten und somit auch die Optimierung der Bettungs- und Fugenmaterialien in Bezug auf deren me-

chanische Festigkeit, Verfestigungsneigung und Langzeitwasserdurchlässigkeit zu ermöglichen.

## 1.2 Einfluss des Fugenmaterials

In der Vergangenheit wurde häufig davon ausgegangen, dass in erster Linie die Bettungsmaterialien verantwortlich für die Entstehung nicht ausreichend wasserdurchlässiger Bettungen sind. Dies wurde damit begründet, dass die mörtelähnlichen, verfestigten Schichten in der Oberfläche der Bettung vorgefunden wurden und deren Wasserdurchlässigkeit reduzierten (Bild 5) [L 9].



Bild 3: Steinverschiebungen und Bildung von Spurrinnen

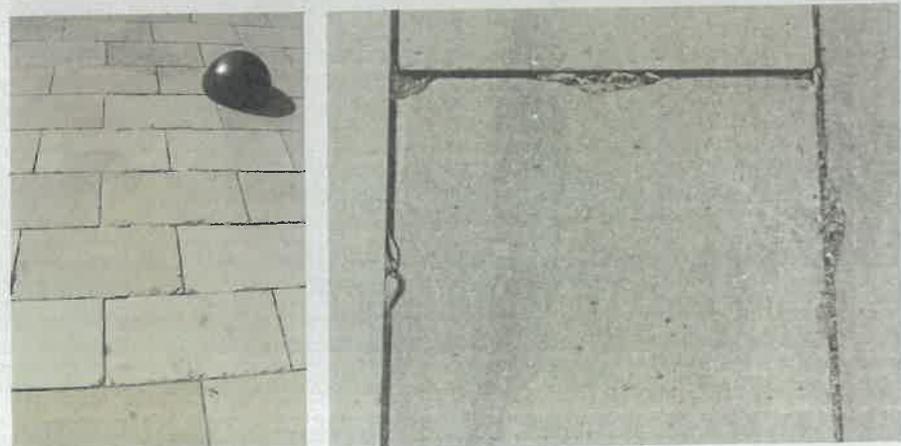


Bild 4: Kantenschäden an Betonplatten



Bild 5: Verfestigung der Oberfläche der Bettung

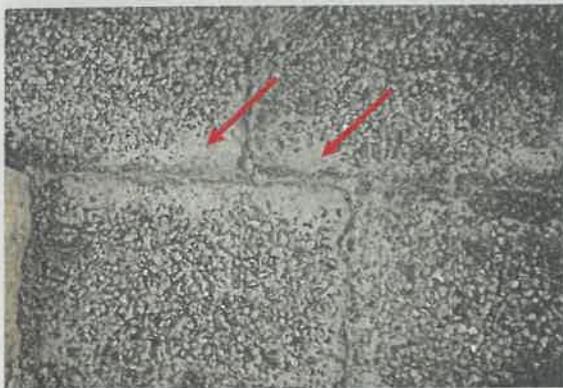


Bild 6: Beginn der Verfestigung der Bettung unter der Fuge

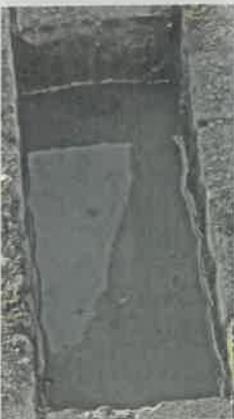
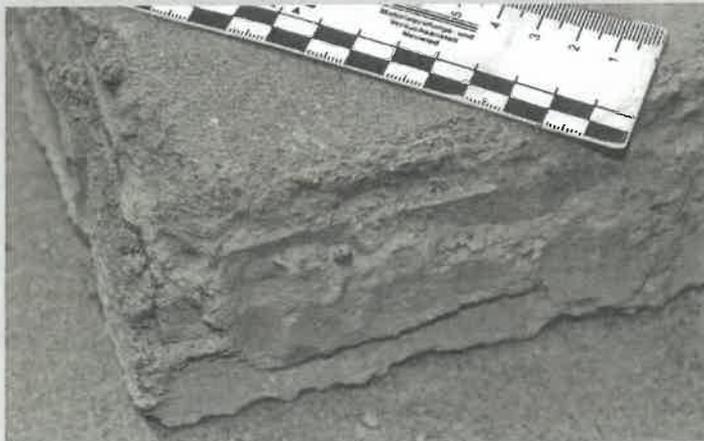


Bild 7: Von der Fuge ausgehende Verfestigung unter der Steinmitte

Bild 8: Verfestigtes, ursprünglich ungebundenes Fugenmaterial



Erst die Erkenntnis, dass die Verfestigung der Bettung bei weniger stark belasteten Teilflächen bevorzugt im Bereich unter den

Fugen begann und sich erst bei höherer Beanspruchung von der Fuge aus in Richtung Steinmitte ausdehnte [L 9] (Bilder 6

und 7), führte zu einem Überdenken dieser Annahme.

In einigen Schadensfällen war die Fuge darüber hinaus bereits so stark verfestigt, dass selbst in der Fuge ein mörtelähnliches Material vorgefunden wurde [L 9] (Bild 8).

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass im Rahmen des Forschungsvorhabens vergleichbare Verfestigungen bereits bei der Anlieferung einiger Fugenmaterialien in Big Bags (hier am Beispiel eines Quarzits) vorgefunden wurden (Bild 9), sofern die Materialien zur Verfestigung neigen.

Diese Beispiele belegen eindrucksvoll, dass zumindest in einigen Fällen nicht allein das Bettungsmaterial, sondern im Besonderen auch das Fugenmaterial verantwortlich für die Verfestigung der Oberfläche der Bettung und damit für die Reduzierung ihrer Wasserdurchlässigkeit sein kann.

### 1.3 Einfluss der Kornfestigkeit

Um die Gefahr der Kornverfeinerung durch die Zertrümmerung der Fugen- und Bettungsmaterialien durch die Nutzung der Pflasterdecken zu reduzieren, fanden bereits in der Vergangenheit Anforderungen an die Kornfestigkeit der Gesteinskörnungen Eingang in die einschlägigen Technischen Regelwerke. So finden sich beispielsweise in den ZTV Pflaster-StB belastungsabhängige Anforderungen an den Schlagwiderstand bzw. den Los-Angeles-Wert der zu verwendenden, groben Gesteinskörnung:

- Normale Beanspruchung:  $SZ_{22}/LA_{25}$  (Bk1,0 und Bk1,8);
- Besondere Beanspruchung:  $SZ_{18}/LA_{20}$  (Bk3,2).

Besondere Beanspruchungen liegen nach RStO 12 in den nachfolgenden Fällen vor:

- Spurfahrender Verkehr oder enge Kurven;
- Häufige Brems- und Beschleunigungsvorgänge;
- In Bereichen mit einer Längsneigung über 6 %;
- In Bereichen mit hohen statischen Punktlasten (z. B. Containerstellplätze);
- In Bereichen, in denen schwere Fahrzeuge auf engem Raum rangieren.

Besonders bei einigen kalksteinhaltigen Gesteinskörnungen besteht seit Langem der Verdacht, dass sie bezüglich der Kornfestigkeit und damit der Verfestigungsneigung als kritisch für die Verwendung als Fugen- und Bettungsmaterial zu betrachten sind. Aus diesem Grunde fand sich bereits in den „alten“ Regelwerken die Vorgabe, dass kalk-

steinhaltige Gesteinskörnungen nur dann als Fugen- und Bettungsmaterial höher belasteter Verkehrsflächen eingesetzt werden dürfen, wenn „positive Langzeiterfahrungen“ mit diesen Materialien bei der Verwendung in Pflasterdecken vorliegen.

Das Hauptproblem des bisherigen Regelwerks besteht darin, dass keines der genannten Prüfverfahren zur Bestimmung der Kornfestigkeit (Schlagzertrümmerung oder Los-Angeles-Wert) dafür geeignet ist, die Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien konkret zu bestimmen bzw. zu bewerten. So hat die Bestimmung der Kornfestigkeit gemäß dem bisherigen Regelwerk an den nachfolgenden Prüfkörnungen zu erfolgen:

- Bestimmung der Schlagzertrümmerung an der Prüfkörnung 8/12,5 mm bzw. 35/45 mm bzw.
- Prüfung des Los-Angeles-Wertes an der Prüfkörnung 10/14 mm.

Keiner der genannten Prüfkornanteile (alleamt Körner > 8 mm) ist aber in üblichen Fugen- und Bettungsmaterialien (0/4 mm, 0/5 mm, 0/8 mm) enthalten, sodass die Kornfestigkeit der konkret zur Anwendung kommenden Fugen- und Bettungsmaterialien mittels dieser Verfahren nicht prüfbar und damit auch nicht bewertbar ist.

Weiterhin ist bekannt, dass sich die Kornfestigkeit der Grobkornanteile nur in sehr begrenztem Umfang auf die Kornfestigkeit der feineren Körnungen übertragen lässt. Dies lässt sich allein dadurch erklären, dass sich die Art des Brechvorgangs auf die Kornfestigkeit der feiner gebrochenen Gesteinskörner auswirkt.

Bild 10 zeigt die Gegenüberstellung der im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten  $MM_{DE}$ -Werte der feineren Gesteinskörnung und der Schlagzertrümmerungswerte der Grobkörnung.

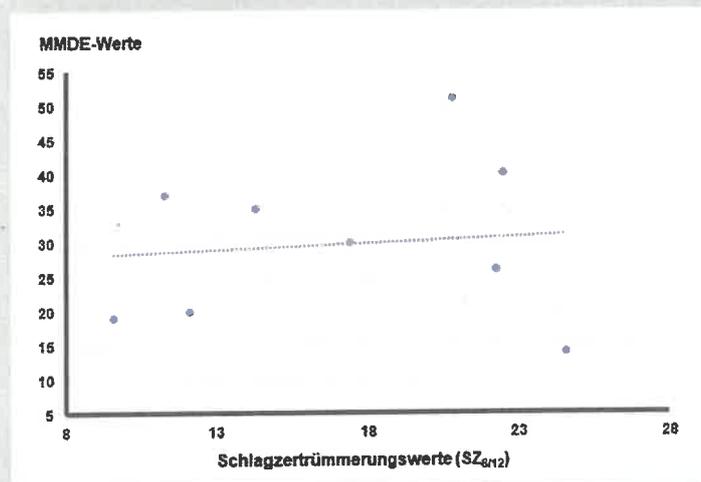
Wie diese Werte anschaulich zeigen, liegt kein sachgerechter Zusammenhang zwischen diesen Prüfergebnissen vor. Genau aus diesem Grunde enthalten die ZTV Pflaster-StB den nachfolgenden Hinweis:

„Zur Einschätzung der Eignung und zur Erfahrungssammlung kann zusätzlich der modifizierte Micro-Deval-Koeffizient nach den TP Gestein-StB, Teil 5.5.3 bestimmt werden.“

Bei der Bestimmung der Kornfestigkeit mittels des modifizierten Micro-Deval-Verfahrens wird eine Gesteinskörnung 0/5,6 mm (bei dem Verfahren nach Anhang A eine



Bild 9: Bei der Anlieferung bereits teilweise verfestigtes Fugenmaterial



Grafik 1: Zusammenhang zwischen den  $SZ_{8/12}$ -Werten und den  $MM_{DE}$ -Werten

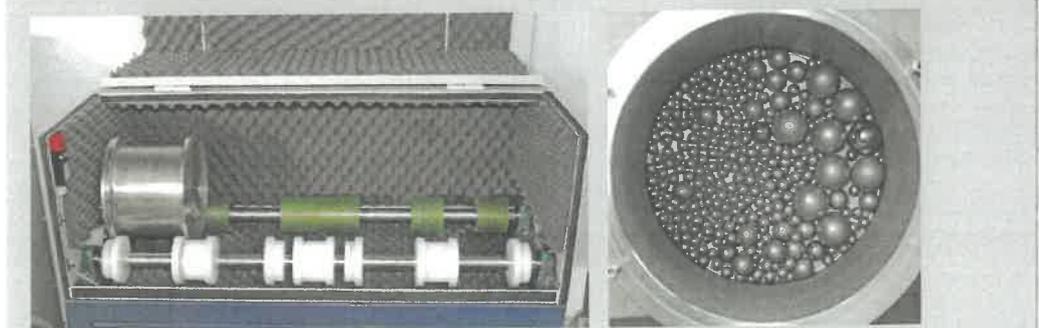


Bild 10: Verfahren zur Bestimmung der Kornfestigkeit mittels des modifizierten Micro-Deval-Verfahrens

Gesteinskörnung 0/2 mm) in einer rotierenden Trommel mit Stahlkugeln und Wasser beansprucht [L 5] (Bild 10).

Mittels dieses Verfahrens können demnach auch Fugen- und Bettungsmaterialien auf deren Kornfestigkeit untersucht werden. Obwohl dieses Verfahren seit Jahren bekannt ist, wurden bislang nur vereinzelte Prüfungen an Fugen- und Bettungsmaterialien durchgeführt. Dies erklärt sich damit, dass im einschlägigen Regelwerk keine Vorgaben an die Durchführung der Prüfung der Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien gemacht wurden und dort auch keine Anforderungen an die Kornfestigkeit dieser Materialien enthalten sind, weshalb

nahezu kein Bauherr entsprechende Materialkennwerte abfragte.

Aufgrund einer steigenden Anzahl an Schadensfällen, bei denen auf der Bettung eine massive Feinteilanreicherung (Verfestigung) und in der Folge eine reduzierte Wasserdurchlässigkeit vorgefunden wurde [L 9], wurden erste Anforderungen an die Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien in einige einschlägige Regelwerke aufgenommen. Vorreiter waren hier die ZTV Wegebau und das FGSV-Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Großformaten (M FG), in denen die nachfolgenden Anforderungen an die Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien aufgenommen wurden:

Nutzung				x				Probe 1a	Probe 1b		
Einwaage	0,09 - 0,25 mm	[g]	Probe 1		200,0	[g]	0,25 - 0,5 mm	60,0	60,0		
	0,25 - 0,71 mm		200,0	0,5 - 1 mm	140,0		140,0				
	0,71 - 2,0 mm		100,0	1 - 2 mm	115,0		115,0				
	Summe		500,0	2 - 4 mm	85,0		85,0				
Siebdurchgang			[M.-%]	120,0	4 - 5,6 mm		100,0	100,0			
Siebrückstände			[g]	192,1	Summe		500,0	500,0			
	0,09 mm			109,5	Siebrückstand m auf dem 0,063 mm-Sieb			[g]	420,5	422,2	
	0,25 mm			69,1	Micro-Deval-Koeffizient			$MM_{DE} = (500-m)/5$	[-]	16	16
	0,71 mm			370,7						16	
Siebdurchgang			[M.-%]	176,3							
Änderung des Siebdurchgangs			[M.-%]	58,3							
Micro-Deval-Koeffizient		$MM_{DE} = (500-m)/5$	[-]	19							

Tabelle 1: Ergebnisse der Bestimmung der Kornfestigkeit des Fugenmaterials (linke Tabelle) bzw. des Bettungsmaterials (rechte Tabelle)



Bild 11: Verfestigung der Bettung

Tabelle 2: Ergebnisse der Bestimmung der Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien bei normativer Prüfung bzw. bei der Prüfung an der Ausgangsiegelinie

Kennzeichnung	Material	Korngruppe	MMDE-Werte	
			Sofort	
			Originalzustand	normativ
A	Grauwacke	0/5 mm	17,8	20,0
B	Diabas	0/5 mm	29,5	37,0
C	Kalkstein	0/5 mm	13,7	14,0
D	Quarzit	0/5 mm	25,4	30,0
E	Basaltlava	0/5 mm	18,7	18,0
F	Basalt	0/5 mm	22,3	26,0
G	Basalt	0/2 mm	--	16,0
H	Basalt	1/3 mm	16,5	nicht möglich
I	Basalt	2/5 mm	11,5	nicht möglich
J	RC	0/5 mm	25,3	25,0
K	RC	0/5 mm	19,2	20,0
L	Kiessand	0/5 mm	25,6	26,0
M	Kalkstein	0/5 mm	36,7	40,0
N	Kalkstein	0/5 mm	37,5	51,0
O	Grauwacke	0/5 mm	27,8	35,0
P	Diabas	0/5 mm	19,0	19,0
Q	Kiessand	0/5 mm	25,6	26,0

M FG

-  $MM_{DE} < 25$  für Fugen- und Bettungsmaterialien.

ZTV Wegebau

- Für die Nutzungskategorien N2 und N3  $MM_{DE} < 35$  für Fugen- und Bettungsmaterialien.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens sollte aus diesem Grunde (soweit möglich) auch überprüft werden, welche Grenzwerte für die  $MM_{DE}$ -Werte von Fugen- und Bettungsmaterialien sachgerecht und realistisch sind.

1.4 Einfluss der Feinanteile der Fugen- und Bettungsmaterialien

Neben der Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien spielt auch deren Gehalt an Feinanteilen zum Zeitpunkt des Einbaus eine wesentliche Rolle bei der Verfestigungsneigung der Bettung. So wurden die Kornfestigkeiten der Fugen- bzw. Bettungsmaterialien z. B. bei der Pflasterdecke einer Straße mit massiven Steinverschiebungen und einer Verfestigung der Oberfläche der Bettung (Bild 11) mittels des modifizierten Micro-Deval-Versuchs bestimmt, wobei trotz der starken Verfestigung der Bettung hohe Kornfestigkeiten der Fugen- ( $MM_{DE} = 19$ ) und Bettungsmaterialien ( $MM_{DE} = 16$ ) ermittelt wurden (Tabelle 1).

Bei der Überprüfung der übergebenen Unterlagen zur Korngrößenverteilung des Fugenmaterials zeigte sich aber, dass die als Fugenmaterial eingesetzte, gebrochene Gesteinskörnung zum Lieferzeitpunkt (abweichend von den Vorgaben des Regelwerks) einen Gehalt an Feinanteilen  $< 0,063$  mm von 14,0 M.-% enthielt. Da die einzelnen Pflastersteine der befahrenen

Pflasterdecke nur eine verhältnismäßig geringe Lagestabilität aufwies, wanderten die Feianteile des Fugenmaterials im Rahmen der Nutzung auf die Bettung und setzten die Oberfläche der Bettung zu, sodass sich hier eine verfestigte, mörtelähnliche Schicht bildete. Im Ergebnis wies die Bettung dieser Flächenbefestigung erwartungsgemäß eine deutlich reduzierte Wasserdurchlässigkeit auf.

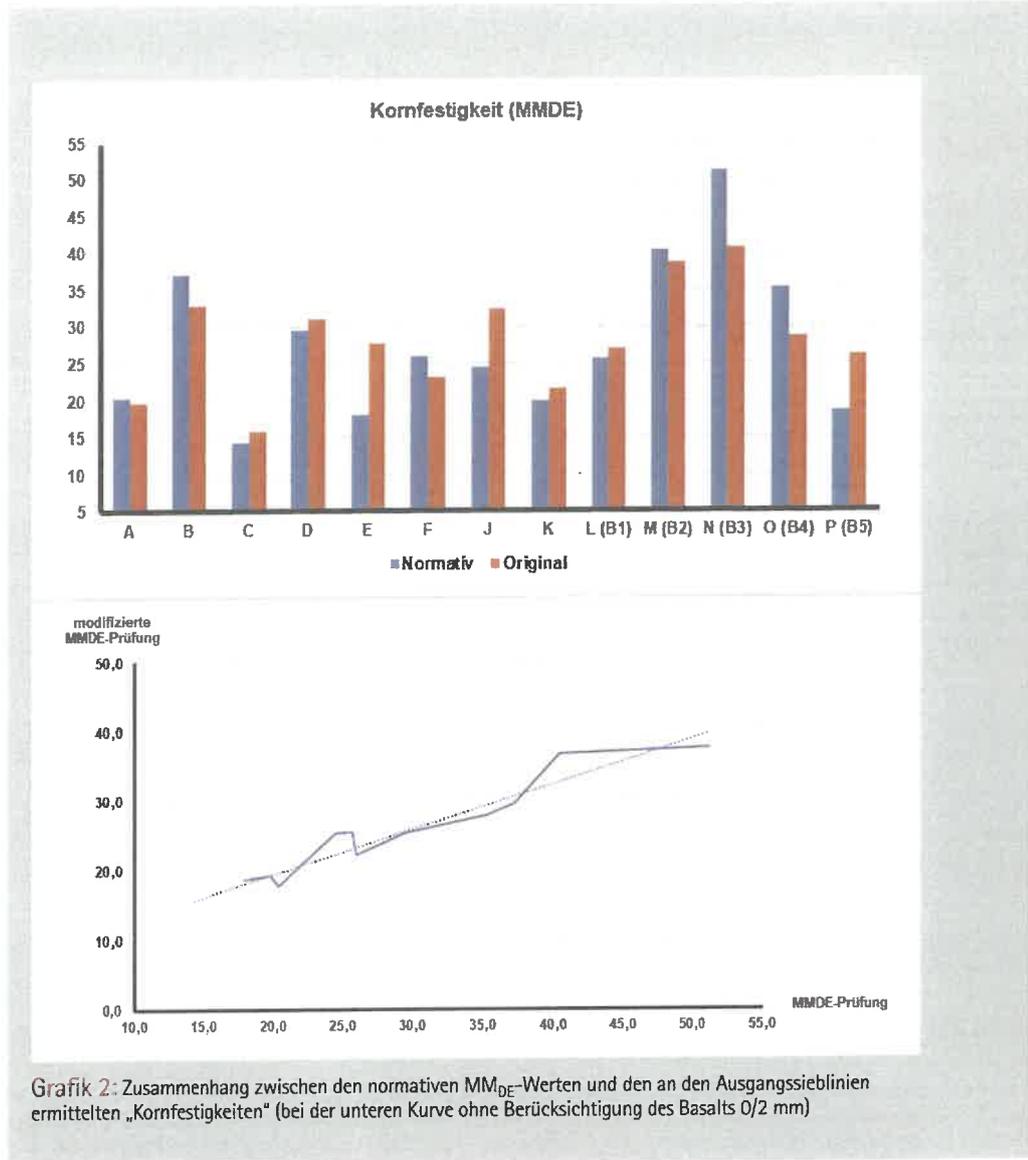
## 2 Wesentliche Erkenntnisse des Forschungsvorhabens

### 2.1 Verfahren zum Nachweis der Kornfestigkeit von Fugen- und Bettungsmaterialien

Das aktuelle Verfahren zum Nachweis der Kornfestigkeit ( $MM_{DE}$ ) der Fugen- und Bettungsmaterialien gemäß TP Gestein-StB, Teil 5.5.3 hat einige Nachteile:

- Es sind nur die Korngruppen 0/2 mm und 0/5 mm prüfbar. Materialien ohne „Nullanteil“ (1/3 mm oder 2/5 mm) oder mit einem anderen Größtkorn (0/4 mm) lassen sich mittels dieses Verfahrens nicht bewerten.
- Da die Sieblinie im Rahmen der Untersuchung konkret zusammengesetzt werden muss, handelt es sich hierbei um ein Verfahren, welches Materialkennwerte bewertbar macht, welches aber nicht geeignet zur Beurteilung der tatsächlichen Lieferkornung ist.
- Da die Materialien gesiebt und wieder neu zusammengesetzt werden müssen, handelt es sich um eine vergleichsweise aufwendige Prüfung.

Aus den genannten Gründen wurden die



Grafik 2: Zusammenhang zwischen den normativen  $MM_{DE}$ -Werten und den an den Ausgangssieblinien ermittelten „Kornfestigkeiten“ (bei der unteren Kurve ohne Berücksichtigung des Basalts 0/2 mm)

Fugen- und Bettungsmaterialien im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht nur mittels des normativen Verfahrens ( $MM_{DE}$ -Verfahren gemäß TP Gestein-StB, Teil 5.5.3) auf deren Kornfestigkeit untersucht, vielmehr erfolgte die Untersuchung zusätzlich mittels

eines abgewandelten Verfahrens, bei dem die Ausgangssieblinien der Materialien für die Durchführung der Untersuchungen eingesetzt wurden.

Wie die Ergebnisse der Untersuchungen aus Tabelle 2 zeigen, korrelieren die Ergebnisse

**ECORASTER**  
Das Bodengitter

**Mehr Sicherheit.  
Auch in Kurven!**

PURUS

www.ecoraster.de

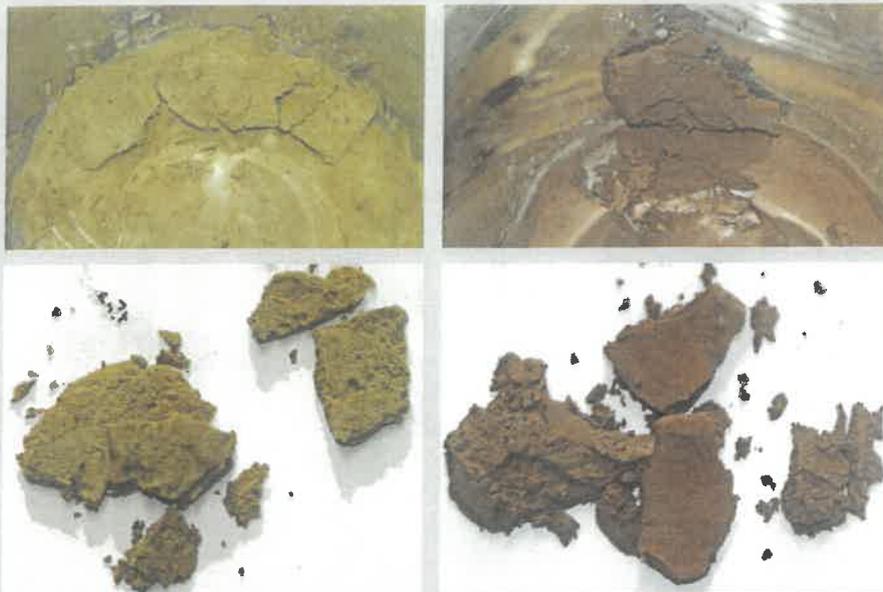


Bild 12: Verfestigungsneigung der Feinanteile < 0,063 mm eines Quarzes (links) und einer Lavaschlacke (rechts)

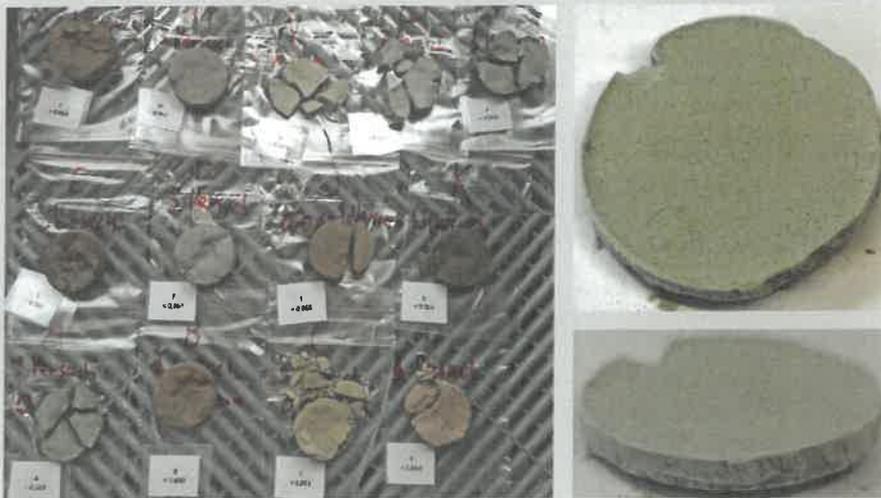


Bild 13: Verfestigungsneigung der Feinanteile < 0,063 mm

Bild 14: Verfestigungsneigung der Feinanteile 0,063–0,125 mm



dieser beiden Verfahren mit einigen wenigen Ausnahmen recht gut.

Dies gilt besonders dann, wenn die im Ausgangsmaterial enthaltenen Feinanteile < 0,063 mm bei den Untersuchungsergebnissen in Abzug gebracht werden (Grafik 2).

## 2.2 Verfestigungsneigung der Feinanteile

Wie in Abschnitt 1.4 dieses Beitrags ausgeführt wurde, können Feinanteile aus den Fugen- und Bettungsmaterialien zur Verfestigung der Oberfläche der Bettung führen.

*Anmerkung: Der Begriff „Verfestigung“ ist nicht so zu verstehen, dass die Proben im Rahmen einer Druckfestigkeitsprüfung eine hohe „Druckfestigkeit“ aufweisen. Vielmehr ist der Begriff hier so zu verstehen, dass die Proben einen signifikanten Zusammenhalt aufwiesen.*

Hierbei ist noch ungeklärt, welche Korngröße besonders kritisch hinsichtlich der Verfestigungsneigung der Bettung ist. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Feinanteile von Gesteinskörnungen mehr oder minder materialunabhängig zur Verfestigung neigen. Die bisherigen Erkenntnisse aus Laborversuchen lassen dies vermuten, allerdings sprechen die Erfahrungen aus Schadensfällen eher dagegen. So wurden bislang keine Schäden bekannt, bei denen z. B. als Bettungsmaterial eingesetzte Quarzsande eine derartige, durch eine Verfestigung verursachte, „Abdichtung“ zeigten. Aus diesem Grunde wurden orientierende Vorversuche in der MPVA Neuwied GmbH durchgeführt, bei denen die Feinanteile < 0,063 mm exemplarisch eines Quarzsands und einer Lavaschlacke abgetrennt und im Labor wie nachfolgend beschrieben untersucht wurden:

1. Einschlämmen der Feinanteile mit Wasser;
  2. Eintrocknen des Prüfguts an der Luft.
- Im Rahmen dieser orientierenden Versuche zeigte sich, dass beide im Rahmen dieser Vorversuche eingesetzten Materialien (also auch die Feinanteile des Quarzsands, für die in der Praxis bislang keine derartigen Schäden bekannt sind) eine deutliche Verfestigungsneigung zeigten (Bild 12).

Auf Basis der weitergehenden Vorversuche wurden die nachfolgend genannten Anteile der im Rahmen des Forschungsvorhabens eingesetzten Fugen- und Bettungsmateria-

lien auf deren Verfestigungsneigung und anschließend auf deren Wasserdurchlässigkeit untersucht:

1. Nullversuch am Versuchsaufbau ohne Material;
2. Originalmaterial;
3. Feinanteile < 0,063 mm bzw. 0,063 bis 0,125 mm der Fugen- bzw. Bettungsmaterialien;
4. Aufbau bestehend aus den Originalmaterialien und den aufgebracht Feinanteilen < 0,063 mm.

Hierzu wurden die o. g. Materialien in Kunststoffrohre eingebracht, die an allen relevanten Stellen abgedichtet wurden und an der Unterseite mit einem wasserdurchlässigen Vlies versehen wurden. Die Bilder 13 und 14 zeigen exemplarisch die „Verfestigung“ der Feinanteile < 0,063 mm (Bild 13) und der Feinanteile 0,063–0,125 mm (Bild 14) nach Abschluss der Versuche.

Wie diese Bilder zeigen, wiesen alle Fugen- und Bettungsmaterialien bei beiden Kornfraktionen nach Abschluss des Versuchs eine signifikante Verfestigung auf. Dies gilt auch für den Sonderversuch, bei dem die Feinanteile < 0,063 mm in dünner Einbaustärke auf ein Bettungsmaterial 0/5 mm aufgebracht wurden.

Die im Rahmen dieser Versuche für die untersuchten Prüfkörnungen ermittelten Entwässerungsgeschwindigkeiten sind Tabelle 3 zu entnehmen, wobei die Ergebnisse, bei denen eine Wasserdurchlässigkeit von  $1,0 \times 10^{-5}$  m/s nicht erreicht wurde, mit einem roten Hintergrund und die, bei denen eine Wasserdurchlässigkeit von  $1,0 \times 10^{-5}$  m/s überschritten wurde, mit einem grünen Hintergrund dargestellt sind.

Wie diese Ergebnisse zeigen, wiesen die Feinanteile < 0,063 mm und 0,063 bis 0,125 mm (trotz einer Einbaustärke der Feinanteile von nur ca. 2 mm i. d. R.) im Normalfall nur geringe bis sehr geringe Entwässerungsgeschwindigkeiten unter bis deutlich unter  $1 \times 10^{-5}$  m/s auf.

Auch die Proben, bei denen die Feinanteile < 0,063 mm in dünner Lage auf die Originalproben aufgebracht wurden, wiesen tendenziell nur geringe Wasserdurchlässigkeiten auf.

Hier ergaben sich besonders bei den feinanteilarmen Basalten und den feinanteilarmen Grauwacken erwartungsgemäß günstigere Wasserdurchlässigkeiten als bei den anderen Materialien.

Übersicht über die Entwässerungsgeschwindigkeiten						
Kennzeichnung	Material	Korngruppe	Entwässerungsgeschwindigkeit [ $10^{-5}$ m/s]			
			Originalmaterial	Feinanteile < 0,063 mm	Feinanteile 0,063 - 0,125 mm	Feinanteile < 0,063 mm auf Originalmaterial
A	Grauwacke	0/5 mm	33,0	0,88	0,0095	5,3
B	Diabas	0/5 mm	8,7	0,63	0,0093	0,49
C	Kalkstein	0/5 mm	33,0	0,010	2,20	0,50
D	Quarzit	0/5 mm	2,4	0,0058	1,10	0,32
E	Basaltlava	0/5 mm	6,7	0,51	0,0082	2,0
F	Basalt	0/5 mm	33,0	0,58	0,0098	5,7
G	Basalt	0/2 mm	33,0	--	--	9,0
H	Basalt	1/3 mm	33,0	--	--	5,7
I	Basalt	2/5 mm	33,0	--	--	32,0
J	RC	0/5 mm	2,2	0,97	0,58	0,94
K	RC	0/5 mm	33,0	2,20	0,010	0,67
L	Kiessand	0/5 mm	33,0	0,65	2,20	0,25
M	Kalkstein	0/5 mm	33,0	0,86	0,0094	0,36
N	Kalkstein	0/5 mm	33,0	0,0094	1,00	0,25
O	Grauwacke	0/5 mm	33,0	0,60	0,0098	2,7
P	Diabas	0/5 mm	0,65	0,25	0,25	0,39
Mittelwert			23,98	0,63	0,57	4,16

Tabelle 3: Vergleich der Entwässerungsgeschwindigkeiten



Bild 15: Vibrationshammer nach DIN 13286-4

### 2.3 Dauerlagerung bei Feuchtezufuhr und mechanischer Beanspruchung

Im Rahmen von Vorversuchen wurden die nachfolgenden Einflüsse auf das Setzmaß, das optische Erscheinungsbild und die Kornverfeinerung der mit einem Vibrationshammer belasteten Fugen- und Bettungsmaterialien erfasst:

- Festlegung der Verdichtungszeit mit dem Vibrationshammer nach DIN 13286-4 (Bild 15), sodass ein Setzmaß von ca. 20 % erreicht wurde;
- Abschätzung des Einflusses der Einbaufeuchte (lufttrocken und bei vorheriger Wasserzugabe vor dem Verdichten) auf die mit dem Vibrationshammer verdichteten Proben;



Bild 16: Optisches Erscheinungsbild des Recyclingmaterials „J“ nach einmaliger Beanspruchung im lufttrockenen Zustand



Bild 17: Optisches Erscheinungsbild der Grauwacke „A“ nach einmaliger Beanspruchung im lufttrockenen Zustand



Bild 18: Optisches Erscheinungsbild des Diabas „P“ nach einmaliger Beanspruchung im feuchten Zustand



Bild 19: Optisches Erscheinungsbild des Recyclingmaterials „J“ nach einmaliger Beanspruchung im feuchten Zustand

- Zur Abschätzung des Einflusses der Einbauhöhe erfolgten orientierende Voruntersuchungen mit einer Einbauhöhe von 40 mm (praktische Einbauhöhe einer Bettung) und von 125 mm (für die Durchführung der an die Dauerlagerung anschließenden Prüfungen erforderlich) auf die mit dem Vibrationshammer verdichteten Proben.

### 2.3.1 Randbedingungen im Rahmen der Dauerlagerung

Auf Basis der im Rahmen der Vorversuche gewonnenen Erkenntnisse wurden die nachfolgenden Versuchsbedingungen für die weitergehenden Untersuchungen festgelegt:

- Festlegung der Verdichtungszeit mit dem Vibrationshammer, sodass ein Setzmaß von ca. 20 % erreicht wurde;
- Verwendung einer Einbauhöhe von 40 mm für die Beurteilung des optischen Erscheinungsbildes der Proben und von 125 mm für die Durchführung der anschließenden Untersuchungen ( $MM_{DE}$ , CBR, Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130);
- Einstellung der Verdichtungszeit mit dem Vibrationshammer auf 60 sec;
- Flächiges Annässen der Proben 2 x wöchentlich mit jeweils 35 ml Wasser;
- Die Laufzeit der Versuche wurde auf 6 bzw. 12 Monate festgelegt.

Die Proben wurden im Rahmen der Dauerlagerung 2 x wöchentlich angefeuchtet und 1 x monatlich mit dem Vibrationshammer belastet.

### 2.3.2 Beurteilung des optischen Erscheinungsbildes (Feinanteilanreicherung und Verfestigungsneigung)

Im Rahmen der Beurteilung des optischen Erscheinungsbildes der Proben bei Verdichtung im lufttrockenen bzw. feuchten Zustand zeigte sich bereits nach einem Verdichtungsdurchgang, dass sich Feinanteile der Proben in reduziertem Umfang an der Probenoberseite und in erheblichem Umfang an der Probenunterseite ansammelten und hier auch teilweise zu einer Verfestigung geführt haben. In den Bildern 16–19 sind exemplarische Fotos ausgewählter, im lufttrockenen Zustand bzw. im feuchten Zustand verdichteter Proben dargestellt.

In den Tabellen 4 und 5 sind die Ergebnisse der Beurteilung des optischen Erscheinungsbildes (Feinanteilanreicherung bzw. Verfes-

tigungsneigung) nach der Verdichtung der Proben im lufttrockenen Zustand bzw. im feuchten Zustand in Abhängigkeit von den Gehalten an Feinanteilen bei Beginn der Versuche dargestellt.

Wie diese Ergebnisse zeigen, war bei einem großen Teil der Proben eine signifikante Verfestigungsneigung nach Abschluss der 12-monatigen Lagerung (im Normalfall auch schon deutlich früher) erkennbar.

Bei den Proben, die im Rahmen des Handlings zerfielen (schwarze Felder), handelt es sich tendenziell um die weniger verfestigten Proben, die häufig geringere Feinanteilgehalte < 0,063 mm enthielten.

### 2.3.3 Beurteilung der Kornverfeinerung nach der Beanspruchung

Eines der Ziele des Forschungsvorhabens bestand darin, den Einfluss der Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien auf die Feinanteilanreicherung und damit die Verfestigungsneigung zu beurteilen. Aus diesem Grunde wurden alle Materialien nach Abschluss der Einlagerungszeit dahingehend untersucht, wie stark sich die Korngrößenverteilung der Materialien im Rahmen der Versuche verändert hat. Wie die Ergebnisse dieser Untersuchungen in Tabelle 6 und Grafik 3 zeigen, wurde nur eine geringfügige Steigerung der Menge an Feinanteilen < 0,063 mm nach einer Beanspruchungszeit von 6 Monaten mit dem Vibrationshammer vorgefunden.

Die Verdichtung mit dem Vibrationshammer sollte dem Zweck dienen, eine mechanische Beanspruchung der Fugen- bzw. Bettungsmaterialien im Rahmen des Einbaus bzw. über die Nutzungszeit zu simulieren. Allerdings ist festzustellen, dass die gewählte Laborverdichtung (nur 12-malige Verdichtung der Fugen- und Bettungsmaterialien über 1 Jahr Messzeit verteilt) bei Weitem nicht in der Lage ist, eine zum Objekt vergleichbare Nutzung nachzustellen. Die Beanspruchung im Objekt, mit einer Vielzahl an Überrollungen, ist deutlich intensiver als die 12-malige Beanspruchung mit dem Vibrationshammer im Laborversuch.

### 2.3.4 Beurteilung der Verformungsstabilität nach der Beanspruchung

Aufgrund des optischen Erscheinungsbildes der Proben nach Abschluss der Versuche (siehe Abschnitt 2.3.2) war davon auszugehen, dass die eingesetzten Materialien im Rahmen der Versuche in erheblichem Um-

Feinanteilanreicherung in Abhängigkeit von den Feinanteilen								
Kennzeichnung	Material	Korngruppe	Feinanteile		Feinanteilanreicherung			
			< 0,063	< 0,125	oben		unten	
					trocken	feucht	trocken	feucht
I	Basalt	2/5 mm	0,4	0	4 Monate	2 Monate	4 Monate	2 Monate
G	Basalt	0/2 mm	0,7	1	1 Monat	2 Monate	1 Monat	2 Monate
F	Basalt	0/5 mm	0,8	1	6 Monate	2 Monate	6 Monate	2 Monate
O	Grauwacke	0/5 mm	0,8	1	4 Monate	2 Monate	4 Monate	2 Monate
H	Basalt	1/3 mm	0,9	1	1 Monat	2 Monate	1 Monat	2 Monate
L	Kiessand	0/5 mm	1,4	5	11 Monate	3	11 Monate	4
M	Kalkstein	0/5 mm	1,9	3	2	3	4	4
A	Grauwacke	0/5 mm	2	3	1	5 Monate	4	5 Monate
C	Kalkstein	0/5 mm	2,2	4	3	5 Monate	4	5 Monate
K	RC	0/5 mm	2,4	4	2	3	4	4
N	Kalkstein	0/5 mm	3,3	3	4 Monate	2 Monate	4 Monate	2 Monate
B	Diabas	0/5 mm	3,4	7	1	2	4	4
D	Quarzit	0/5 mm	5,7	8	6 Monate	1	6 Monate	4
J	RC	0/5 mm	7,1	11	4	4 Monate	4	4 Monate
P	Diabas	0/5 mm	7,2	11	2	4	4	4
E	Basaltlava	0/5 mm	8,9	14	4 Monate	4	4 Monate	4

0 = Nein <sup>a)</sup> Zeitpunkt an dem die Proben im Rahmen des Handlings zerfallen sind  
 1 = Leicht  
 2 = Mittel  
 3 = Stark  
 4 = Massiv

Tabelle 4: Ergebnisse der Feinanteilanreicherung bei der Verdichtung im lufttrockenen bzw. feuchten Zustand nach der 12-monatigen Beanspruchung

Feinanteilanreicherung in Abhängigkeit von den Feinanteilen								
Kennzeichnung	Material	Korngruppe	Feinanteile		Verfestigung			
			< 0,063	< 0,125	oben		unten	
					trocken	feucht	trocken	feucht
I	Basalt	2/5 mm	0,4	0	4 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>	4 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>
G	Basalt	0/2 mm	0,7	1	1 Monat <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>	1 Monat <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>
F	Basalt	0/5 mm	0,8	1	6 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>	6 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>
O	Grauwacke	0/5 mm	0,8	1	4 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>	4 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>
H	Basalt	1/3 mm	0,9	1	1 Monat <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>	1 Monat <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>
L	Kiessand	0/5 mm	1,4	5	11 Monate <sup>a)</sup>	3	11 Monate <sup>a)</sup>	4
M	Kalkstein	0/5 mm	1,9	3	3	4	4	4
A	Grauwacke	0/5 mm	2	3	2	5 Monate <sup>a)</sup>	4	5 Monate <sup>a)</sup>
C	Kalkstein	0/5 mm	2,2	4	3	5 Monate <sup>a)</sup>	4	5 Monate <sup>a)</sup>
K	RC	0/5 mm	2,4	4	2	3	4	4
N	Kalkstein	0/5 mm	3,3	3	4 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>	4 Monate <sup>a)</sup>	2 Monate <sup>a)</sup>
B	Diabas	0/5 mm	3,4	7	1	2	4	4
D	Quarzit	0/5 mm	5,7	8	6 Monate <sup>a)</sup>	2	6 Monate <sup>a)</sup>	4
J	RC	0/5 mm	7,1	11	4	4 Monate <sup>a)</sup>	4	4 Monate <sup>a)</sup>
P	Diabas	0/5 mm	7,2	11	2	4	4	4
E	Basaltlava	0/5 mm	8,9	14	4 Monate <sup>a)</sup>	4	4 Monate <sup>a)</sup>	4

0 = Nein <sup>a)</sup> Zeitpunkt an dem die Proben im Rahmen des Handlings zerfallen sind  
 1 = Leicht  
 2 = Mittel  
 3 = Stark  
 4 = Massiv

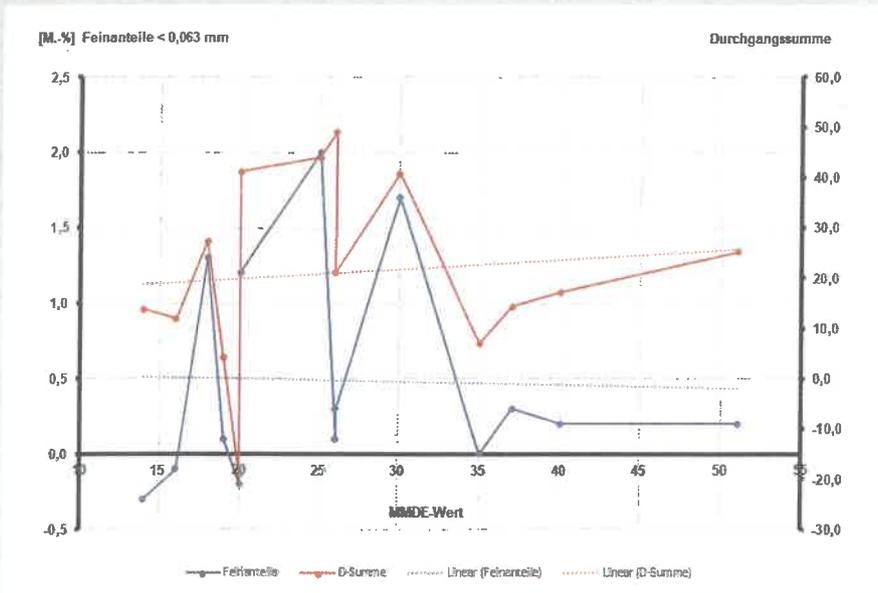
Tabelle 5: Ergebnisse der Verfestigungsneigung bei der Verdichtung im lufttrockenen bzw. feuchten Zustand nach der 12-monatigen Beanspruchung

fang verdichtet wurden, woraus eine reduzierte Verformbarkeit resultierte. Zum Nachweis der Verformungsstabilität wurden die

Proben nach einer Lagerungszeit (inkl. der monatlichen Verdichtung mit dem Vibrationshammer) von 6 und 12 Monaten auf

6 Monate Lagerung (125 mm)																
Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
MMDE	20	37	14	30	18	26	16	-	-	25	20	26	40	51	35	19
Verfeinerung (Feinanteile)	-0,2	0,3	-0,3	1,7	1,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,2	2,0	1,2	0,3	0,2	0,2	0,0	0,1
Veränderung Durchgangssumme	-19,2	14,3	13,7	40,7	27,3	49,1	11,9	4,7	10,8	35,0	41,2	21,3	17,2	25,2	7,0	4,1

Tabelle 6: Ergebnisse der Kornverfeinerung nach der 12-monatigen Lagerung und der monatlichen Beanspruchung mit dem Vibrationshammer



Grafik 3: Zusammenhang zwischen den normativ ermittelten MMDE-Werten und der Kornverfeinerung nach der 6-monatigen Lagerung und der monatlichen Beanspruchung mit dem Vibrationshammer

Tabelle 7: Ergebnisse der CBR-Versuche nach der 6- bzw. 12-monatigen Beanspruchung

Kennzeichnung	Material	Korngruppe	Verformungsstabilität (CBR)		
			nach 6 Monaten Lagerung		nach 12 Monaten Lagerung
			Messwert	Messwert	Erhöhung [%]
A	Grauwacke	0/5 mm	125	180	44
B	Diabas	0/5 mm	185	330	78
C	Kalkstein	0/5 mm	305	540	77
D	Quarzit	0/5 mm	45	110	144
E	Basaltlava	0/5 mm	180	225	25
F	Basalt	0/5 mm	115	215	87
G	Basalt	0/2 mm	25	92,5	270
H	Basalt	1/3 mm	30	90	200
I	Basalt	2/5 mm	105	105	0
J	RC	0/5 mm	120	125	4
K	RC	0/8 mm	140	220	57
L	Kiessand	0/5 mm	225	380	69
M	Kalkstein	0/5 mm	260	495	90
N	Kalkstein	0/5 mm	140	455	225
O	Grauwacke	0/5 mm	60	135	125
P	Diabas	0/5 mm	175	220	26
Mittelwerte				--	95

deren CBR-Werte untersucht. Die hierbei ermittelten Ergebnisse sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Wie diese Ergebnisse zeigen, stieg die Verformungsstabilität der Fugen- und Bettungsmaterialien (bzw. deren Steifigkeit) in erheblichem Umfang (um nahezu 100 % zwischen der 6-monatigen und der 12-monatigen Lagerung) mit der Lagerungs- bzw. Beanspruchungszeit an.

Das belegt, dass die Materialien im Rahmen der Einlagerung, trotz der geringen Belastung, im Normalfall eine massive Verdichtung/Verfestigung erfahren haben (siehe Probe „E“ (links) und Probe „P“ (rechts) im Bild 20).

### 2.3.5 Beurteilung der Kornfestigkeit nach der Beanspruchung

Auch die Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien wurde nach einer Versuchszeit von 6 Monaten (inkl. der monatlichen Verdichtung) mit den Kornfestigkeiten der Ausgangsmaterialien zu Versuchsbeginn verglichen. Im Rahmen dieser Versuche wurden, wie es Tabelle 8 zu entnehmen ist, kaum Unterschiede in den Kornfestigkeiten vorgefunden. Einzig die Fugen- und Bettungsmaterialien mit den geringsten Kornfestigkeiten (Kalksteine M und N) lieferten signifikant höhere Kornfestigkeiten (geringere  $MM_{DE}$ -Werte).

Tabelle 8 zeigt die ermittelten Untersuchungsergebnisse, wobei die Proben, bei denen höhere Kornfestigkeiten ermittelt wurden, mit einem grünen Hintergrund dargestellt sind.

### 2.3.6 Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit nach der Beanspruchung

Abschließend wurde die Wasserdurchlässigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien nach einer Versuchszeit von 12 Monaten (inkl. monatlicher Verdichtung) sinngemäß nach DIN 18130 bestimmt. Die im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Wasserdurchlässigkeiten sind in Tabelle 9 den Wasserdurchlässigkeiten der Ausgangsmaterialien sowie den  $MM_{DE}$ -Werten gegenübergestellt. Dabei wurden die Ergebnisse mit höheren Wasserdurchlässigkeiten als bei den Ausgangsuntersuchungen mit einem „grünen“ Hintergrund und die Ergebnisse mit geringeren Wasserdurchlässigkeiten als bei den Ausgangsuntersuchungen mit einem „roten“ Hintergrund versehen.

Daneben zeigte sich im Rahmen dieser Ver-

suche, dass die Materialien nach Abschluss der Prüfung zumindest teilweise eine massive Verfestigung aufwiesen. In Bild 21 sind exemplarisch einige Proben nach Abschluss des Versuchs dargestellt.

Abschließend wurde die Veränderung der Wasserdurchlässigkeit mit der Kornfestigkeit (den  $MM_{DE}$ -Werten) korreliert. In Tabelle 10 sind die Untersuchungsergebnisse für die Beanspruchungszeit von 12 Monaten zusammengefasst.

Darüber hinaus sind die  $MM_{DE}$ -Werte der Materialien (blaue Linie) in Grafik 4 den Veränderungen der Wasserdurchlässigkeit der Proben (beige Linie) gegenübergestellt.

Wie diese Gegenüberstellung zeigt, nahm die Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit trotz der geringen Beanspruchung im Labor mit sinkenden Kornfestigkeiten (steigende  $MM_{DE}$ -Werte) tendenziell etwas zu. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Belastung im Rahmen der Laborversuche im Vergleich zur Praxis sehr gering war.

### 3 Erfassung von Schäden an Probeflächen

Zur Korrelation der Ergebnisse der Laborversuche wurden zusätzlich insgesamt fünf Testflächen mit unterschiedlichen Bettungsmaterialien und demselben Fugenmaterial in der Ausfahrt eines Kieswerks erstellt (Bild 22).

Diese Probeflächen wurden nach 6 und 12 Monaten in Augenschein genommen, wobei festgestellt wurde, dass sich aufgrund des spurfahrenden Verkehrs und der hohen Belastung der Pflasterdecke signifikante Spurrinnen und leichte Steinverschiebungen eingestellt hatten (Bild 23).

Nach dem Öffnen der Pflasterdecke zeigte sich, dass das Fugenmaterial im Bereich der Spurrinnen in allen Testflächen eine massive Verfestigung aufwies. Auch die Bettung war durch die Verfestigung betroffen, allerdings war die Verfestigung der Bettung bei vier der fünf Testflächen nur im Bereich unter den Fugen erkennbar, was mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auf die Einwanderung der Feinanteile der Fugenmaterialien in die Oberfläche der Bettung zurückzuführen ist (Bild 24).

Bei einer der fünf Probeflächen wies die Bettung allerdings auch unter den Pflastersteinen eine signifikante Verfestigung auf (Bild 25).



Bild 20: Optisches Erscheinungsbild der Oberflächen der Proben nach Abschluss des CBR-Versuchs nach 12-monatiger Beanspruchung

MMDE-Werte					
Kennzeichnung	Material	Korngruppe	normativ		Veränderung
			Sofort	6 Monate	
A	Grauwacke	0/5 mm	20,0	18,0	-2,0
B	Diabas	0/5 mm	37,0	37,0	0,0
C	Kalkstein	0/5 mm	14,0	14,0	0,0
D	Quarzit	0/5 mm	30,0	29,0	-1,0
E	Basaltlava	0/5 mm	18,0	18,0	0,0
F	Basalt	0/5 mm	26,0	25,0	-1,0
G	Basalt	0/2 mm	16,0	nicht möglich	-16,0
H	Basalt	1/3 mm	nicht möglich	nicht möglich	--
I	Basalt	2/5 mm	nicht möglich	nicht möglich	--
J	RC	0/5 mm	25,0	25,0	0,0
K	RC	0/5 mm	20,0	20,0	0,0
L	Kiessand	0/5 mm	26,0	24,0	-2,0
M	Kalkstein	0/5 mm	40,0	35,0	-5,0
N	Kalkstein	0/5 mm	51,0	45,0	-6,0
O	Grauwacke	0/5 mm	35,0	32,0	-3,0
P	Diabas	0/5 mm	19,0	18,0	-1,0
Q	Kiessand	0/5 mm	26,0	24,0	-2,0
<b>Mittelwert</b>					<b>-2,6</b>

Tabelle 8: Ergebnisse der Bestimmung der Kornfestigkeit nach der 6-monatigen Beanspruchung im Vergleich zu den Kornfestigkeiten der Ausgangsmaterialien

Wasserdurchlässigkeit						
Kennzeichnung	Material	Korngruppe	MMDE-Wert	DIN 18 130 [ $10^{-5}$ m/s]		
				Sofort	12 Monate	
A	Grauwacke	0/5 mm	20	9,4	13,4	nicht verfestigt
B	Diabas	0/5 mm	37	11,2	1,7	verfestigt
C	Kalkstein	0/5 mm	14	9,5	2,4	verfestigt
D	Quarzit	0/5 mm	30	9,2	0,7	verfestigt
E	Basaltlava	0/5 mm	18	11,6	0,2	verfestigt
F	Basalt	0/5 mm	26	16,0	16,1	nicht verfestigt
G	Basalt	0/2 mm	16	21,5	12,5	nicht verfestigt
H	Basalt	1/3 mm	--	74,3	23,8	nicht verfestigt
I	Basalt	2/5 mm	--	63,9	46,9	nicht verfestigt
J	RC	0/5 mm	25	14,8	0,1	verfestigt
K	RC	0/5 mm	20	12,3	1,1	verfestigt
L	Kiessand	0/5 mm	26	12,0	0,6	verfestigt
M	Kalkstein	0/5 mm	40	17,2	1,5	verfestigt
N	Kalkstein	0/5 mm	51	15,0	6,1	verfestigt
O	Grauwacke	0/5 mm	35	33,7	5,2	verfestigt
P	Diabas	0/5 mm	19	21,3	0,1	verfestigt
<b>Mittelwerte</b>				<b>22,1</b>	<b>8,3</b>	

Tabelle 9: Ergebnisse der Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach der 12-monatigen Beanspruchung im Vergleich zu den Wasserdurchlässigkeiten der Ausgangsmaterialien

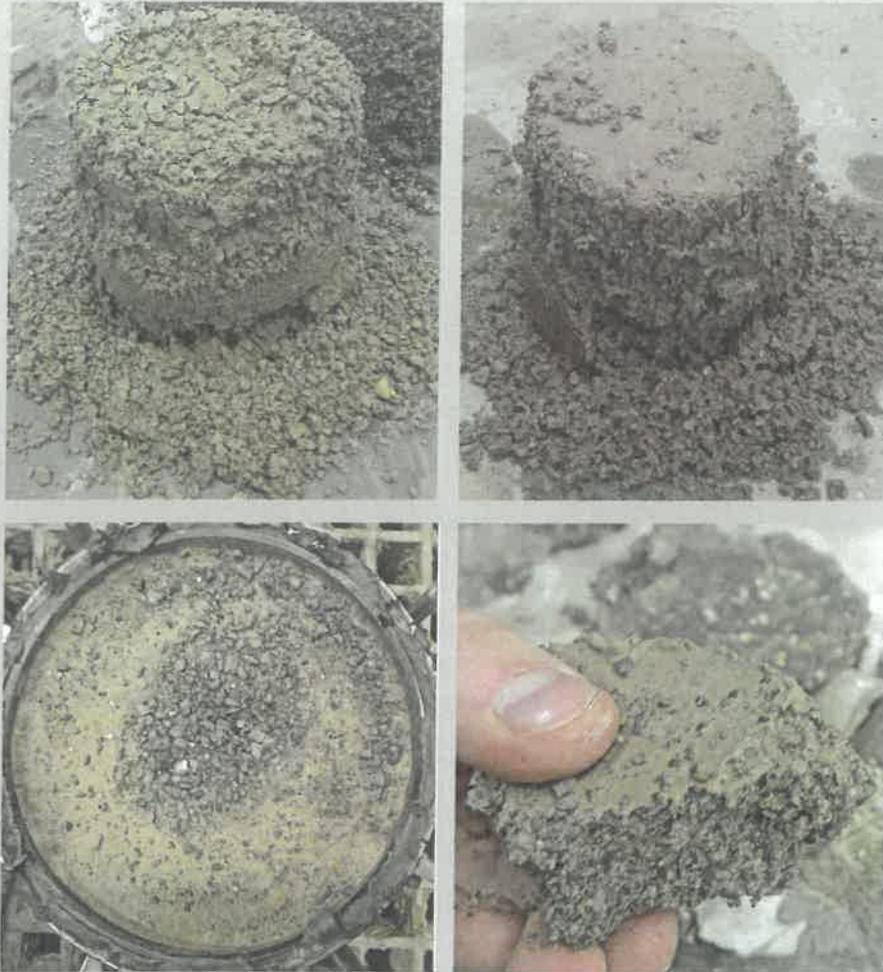
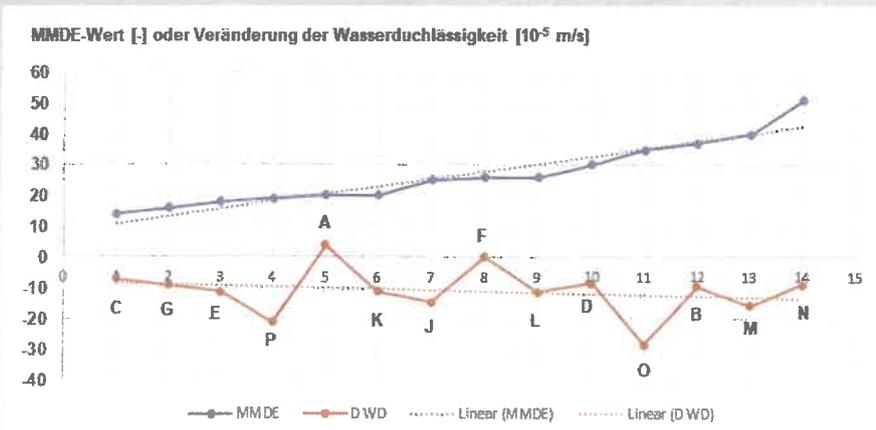


Bild 21: Verfestigung der Proben C (oben links), D (oben rechts) und M (unten) nach Abschluss des Versuchs nach 12-monatiger Beanspruchung

Veränderung der Wasserdurchlässigkeit [ $10^{-5} \text{ m/s}$ ]																
Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
MMDE	20	37	14	30	18	26	16	--	--	25	20	26	40	51	35	19
0 Monate	9,4	11,2	9,5	9,2	11,6	16,0	21,5	74,3	63,9	14,8	12,3	12,0	17,2	15,0	33,7	21,3
12 Monate	13,3	1,7	2,4	0,7	0,2	16,1	12,5	23,8	46,9	0,1	1,1	0,6	1,5	6,1	5,2	0,1

Tabelle 10: Veränderung der Wasserdurchlässigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien nach der 12-monatigen Lagerung und der monatlichen Verdichtung mit dem Vibrationshammer



Grafik 4: Korrelation zwischen den  $MM_{DE}$ -Werten und der Veränderung der Wasserdurchlässigkeiten der Proben

Zur labortechnischen Beurteilung der Veränderungen der Fugen- und Bettungsmaterialien im Rahmen der Nutzung wurden Proben aus den Testflächen entnommen und im Labor der MPVA Neuwied GmbH untersucht.

### 3.1 Bestimmung der Kornverfeinerung des Fugenmaterials der Pflasterdecke

Zur Abschätzung der Kornverfeinerung der Fugenmaterialien wurden diese im Labor der MPVA Neuwied GmbH unter Verwendung der DIN EN 933-1 auf deren Korngrößenverteilung inkl. der Feinanteile  $< 0,063 \text{ mm}$  untersucht. Die hierbei an den Fugenmaterialien ermittelten Ergebnisse sind Tabelle 11 zu entnehmen.

Wie diese Ergebnisse zeigen, war das vor Ort aus den Versuchsflächen entnommene Fugenmaterial im Rahmen der Nutzung deutlich verfeinert worden. So enthielten die Fugenmaterialien nach der 1-jährigen Nutzung der Testflächen der Pflasterdecke im Mittel eine annähernd 10-fache Menge an Feinanteilen  $< 0,063 \text{ mm}$  (über 16 M.-% anstelle von 1,6 M.-%).

### 3.2 Bestimmung der Kornverfeinerung der Bettungsmaterialien der Pflasterdecke

Darüber hinaus wurden auch die Bettungsmaterialien zur Abschätzung der Kornverfeinerung unter Verwendung der DIN EN 933-1 auf deren Korngrößenverteilung inkl. der Feinanteile  $< 0,063 \text{ mm}$  untersucht.

Die hierbei an den Bettungsmaterialien ermittelten Ergebnisse sind Tabelle 12 zu entnehmen, wobei Zellen mit einem roten Hintergrund erhöhte Kornanteile und Zellen mit einem grünen Hintergrund reduzierte Kornanteile auf dem jeweiligen Sieb kennzeichnen.

Wie diese Ergebnisse zeigen, wurden nach der Nutzungszeit der Pflasterdecke von 12 Monaten sowohl an der Oberseite als auch in reduziertem Umfang an der Unterseite der Bettung erhöhte Feinanteile  $< 0,063 \text{ mm}$  vorgefunden.

Einzig beim Diabas wurde keine signifikante Verfeinerung des Bettungsmaterials (weder an der Ober- noch an der Unterseite) vorgefunden, allerdings wies die entsprechende Bettung des Diabas eine erhebliche Verfestigung auf, was zur hohen Kornfestigkeit des Diabas ( $MM_{DE}$ -Wert von 18) passt.



Bild 22: Lage der Testflächen



#### 4 Zusammenfassung

In der nachfolgenden Aufzählung sind die wichtigsten Konsequenzen der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens für die Regelwerksarbeit der FGSV kurz zusammengefasst:

- Im Rahmen der Verdichtung mit dem Vibrationshammer zeigte sich, dass ein großer Anteil der Materialien mit Nullanteil sowohl an der Probenober- als auch an der -unterseite eine Feinanteilanreicherung und im Ergebnis auch eine Verfestigungsneigung aufwies.

Es sollte darüber nachgedacht werden, die Gehalte an Feinanteilen  $< 0,063$  mm aus Gründen der Reduzierung der Entmischungsneigung sowohl bei den Fugen als auch bei den Bettungsmaterialien zu reduzieren. Alternativ könnten die Fugen so dicht ausgeführt werden, dass keine signifikanten Mengen an Wasser in die Fuge eindringen können (Widerspruch zum „Schwammstadtprinzip“).

- Je dicker die Bettung ist, umso größer ist sowohl die Feinanteilanreicherung als auch deren Verfestigungsneigung an der Ober- und Unterseite der Bettung.

Die Einbaustärke der Bettung sollte nicht zu groß gewählt werden.

- Bei der Auswertung der Ergebnisse der Untersuchung der Fugen- und Bettungsmaterialien aus den mit Lkw befahrenen Probeflächen zeigte sich, dass das Fugenmaterial eine massive (ca. 10-fache) Verfeinerung aufwies, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Zermürbung des Fugenmaterials zurückzuführen ist.

Die Kornfestigkeit der Fugenmaterialien

war demnach zu gering: Die Kornfestigkeit der Fugenmaterialien (bestimmt mittels des  $MM_{DE}$ -Versuchs) sollte demnach bei der Planung höher beanspruchter Pflasterdecken abgefragt werden.

- Auch die Bettungsmaterialien unter den Betonpflastersteinen wiesen üblicherweise eine deutliche (ca. 2- bis 6-fache) Verfeinerung auf, während sie in den tieferliegenden Zonen der Bettung (im Übergangsbereich zur Tragschicht) „nur“ noch eine ca. 2-fache Verfeinerung aufwies. Im Besonderen unter Berücksichtigung der Optik der Verfeinerungsbereiche ist von einem Feinanteileintrag aus der Fuge in die Bettung auszugehen.

Es sollte darüber nachgedacht werden, die Gehalte an Feinanteilen  $< 0,063$  mm aus Gründen der Reduzierung der Entmischungsneigung sowohl bei den Fugen als auch bei den Bettungsmaterialien zu reduzieren. Weiterhin

sollten die Fugenmaterialien eine ausreichende Kornfestigkeit aufweisen.

- Der Wasserzutritt zu den Bettungsmaterialien führt zu einer deutlichen Erhöhung der Verfestigungsneigung.

Der Wasserzutritt zur Unterlage der Befestigungselemente sollte soweit möglich reduziert werden (Widerspruch zum

## SCHWARMWISSEN

AUTONOMER

ATS

TEMPERATURSENSOR

- Energieautark
- Wartungsfrei
- Robust
- Leichter Einbau in die Fahrbahndecke
- Datenübertragung in NetwakeVision-Portal und App

Netwake

www.netwake.com



Bild 23: Spurrinnen in der Pflasterdecke

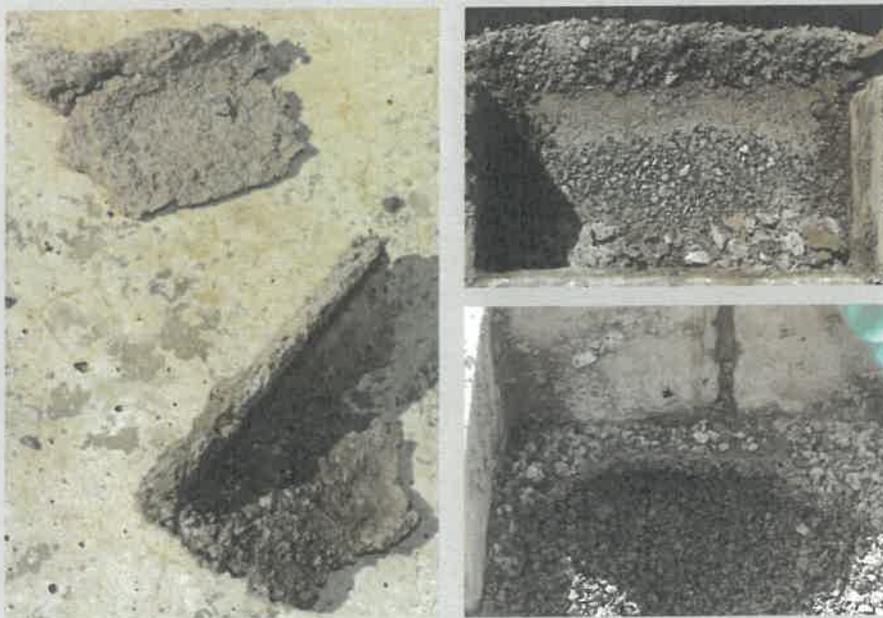


Bild 24: Verfestigung des Fugenmaterials (links) und der Oberfläche der Bettung unter der Fuge (rechts)

„Schwammstadtprinzip“). Demnach sollte eines der Ziele darin bestehen, dass die Fugen eine möglichst geringe Wasserdurchlässigkeit aufweisen sollten (dies passt allerdings nicht zur Reduzierung der Feinanteile der Fugenmaterialien).

- Die Verdichtung der Bettungsmaterialien nimmt mit zunehmender Belastungszeit in erheblichem Umfang zu.

Bei befahrenen Pflasterdecken ist von einer Nachverdichtung der Bettungsmaterialien auszugehen, sodass eine Verfor-

mung der Pflasterdecke auch durch die Bettung nicht auszuschließen ist. Die geringste Nachverdichtung (Steigerung der Verformungsstabilität) trat erwartungsgemäß bei den Bettungsmaterialien ohne Nullanteil (Basalt 1/3 mm und Basalt 2/5 mm) auf, sodass bei diesen Materialien auch im Objekt mit der geringsten Nachverdichtung zu rechnen ist.

- Die Kornfestigkeit der Fugen- und Bettungsmaterialien war im Rahmen der Laborversuche erwartungsgemäß annä-

hernd unabhängig von der Belastungsdauer.

- Die Wasserdurchlässigkeit der Bettungsmaterialien nimmt mit zunehmender Belastungsdauer in erheblichem Umfang ab. Hierbei lieferten besonders die Recyclingmaterialien negative Ergebnisse.

Recyclingmaterialien wiesen im Rahmen der Anfangswasserdurchlässigkeit zwar eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit auf, sollten aus Gründen der besonders großen Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit im Rahmen der Beanspruchung möglichst nicht als Bettungsmaterial befahrener Pflasterdecken eingesetzt werden.

Allerdings wiesen auch einige natürliche Bettungsmaterialien eine deutliche Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit auf.

Auf Basis der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wirken sich die nachfolgenden Einflüsse negativ auf die „ Abdichtung der Bettung“ aus:

- Verwendung von Fugen- oder Bettungsmaterialien mit einer zu großen Menge an Feinanteilen.
- Zermürbung der Fugen- bzw. Bettungsmaterialien aufgrund einer zu geringen Kornfestigkeit der Materialien, wobei erhöhte Mengen an Feinanteilen entstehen.
- Intensität der Befahrung, da die Wandlungstendenz der Feinanteile aus dem Fugenmaterial durch die eingebrachte Energie deutlich erhöht wird.

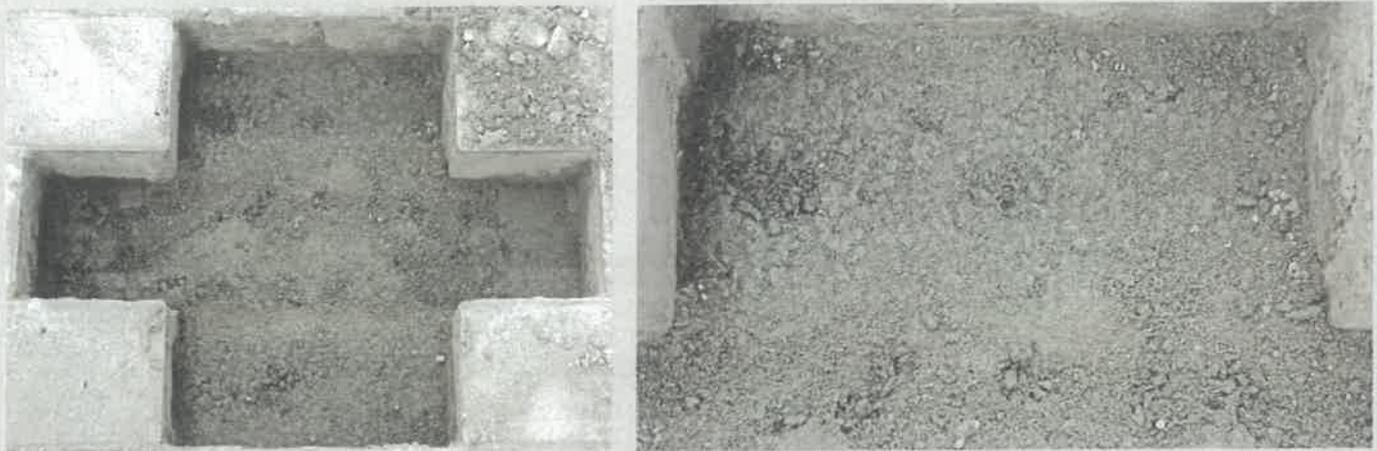


Bild 25: Verfestigung der Bettung auch unter den Betonpflastersteinen

Materialien			Zeitpunkt	Korngrößenverteilung [M.-% Siebdurchgang]											
Kennzeichnung	Material	Korngruppe		0,063 mm	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm	2,8 mm	4 mm	5,6 mm	8 mm	11,2 mm	
Q	Kiessand	0/5 mm	vor Einbau	1,6	7	19	31	42	63	83	99	100	100	100	
				646											
			Fläche 1 nach Nutzung oben	16,0	24	39	55	65	80	93	99	100	100	100	100
				771											
			Fläche 2 nach Nutzung oben	17,2	26	42	56	67	85	96	100	100	100	100	100
				789											
			Fläche 3 nach Nutzung oben	17,0	25	41	56	65	81	93	99	100	100	100	100
				777											
			Fläche 4 nach Nutzung oben	15,8	25	40	53	64	83	95	100	100	100	100	100
	776														
Fläche 5 nach Nutzung oben	16,3	25	41	55	66	82	94	100	100	100	100	100			
	779														
	Mittelwert nach Nutzung	16,5	25	40,6	55	65,4	82,2	94,2	99,6	100	100	100	100		
		778													
	Verfeinerung	14,9	18,0	21,6	24,0	23,4	19,2	11,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0		

Tabelle 11: Wesentliche Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Feianteile < 0,063 mm der Fugenmaterialien

– Reduzierte Lagestabilität der Pflastersteine in der Pflasterdecke, da wenig lagestabile Pflastersteine die Wanderungstendenz der Feianteile aus dem Fugenmaterial auf bzw. in die Bettung begünstigen und zu einer verstärkten Kornzertrümmerung beitragen.

Somit ist im Ergebnis festzustellen, dass zum einen die Menge an Feianteilen im Fugen- und ggf. auch im Bettungsmaterial (unabhängig davon, ob diese bereits zum Einbauzeitpunkt vorlagen oder im Rahmen der Nutzung entstanden sind) und zum anderen die dynamische Belastung der Pflasterdecke einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung der „Abdichtung der Bettung“ haben. Das ist auch der Grund dafür, warum diese Schäden in den Probestellen vorzugsweise

bei höher beanspruchten Pflasterdecken vorgefunden werden [L 9]. Hieraus ergibt sich der Bedarf für weitergehende Forschung, im Rahmen derer die Einflüsse z. B. der Verformungsstabilität der Pflasterdecke, der Dicke der Befestigungselemente, der Fugenbreite sowie der Lagestabilität der Bettung und der Tragschichten auf die Dauerhaftigkeit stärker belasteter Pflasterdecken untersucht werden sollten.

Literaturverzeichnis

[L 1] ATV DIN 18 318: 09-2019. VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Verkehrswegebauarbeiten – Pflasterdecken und Plattenbeläge in ungebundener Ausführung, Einfassungen

[L 2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und

Verkehrswesen e. V. (2022): Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Großformaten (M FG), FGSV Verlag, Köln

[L 3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (2015): Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie für Einfassungen (M FP), FGSV Verlag, Köln

[L 4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12), FGSV Verlag, Köln

[L 5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (05-2020): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 5.5.3: Bestimmung der mechanischen Festigkeit an der Gesteinskörnung 0/5,6 mm – modifiziertes Micro-Deval-Verfahren (TP Gestein-StB), FGSV Verlag, Köln

[L 6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und

Materialien			Korngrößenverteilung [M.-% Siebdurchgang]											
Kennzeichnung	Material	Korngruppe	Zeitpunkt	0,063 mm	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm	2,8 mm	4 mm	5,6 mm	8 mm	11,2 mm
L	Kiessand	0/5 mm	vor Einbau	1,4	5	13	21	29	44	57	74	94	100	100
				538										
			nach Nutzung oben	4,6	9	17	27	37	51	60	75	93	100	100
				574										
			Verfeinerung	3,2	4,0	4,0	6,0	8,0	7,0	3,0	1,0	-1,0	0,0	0,0
M	Kalkstein	0/5 mm	nach Nutzung unten	3,1	7	17	27	36	50	61	76	94	100	100
				571										
			Verfeinerung	1,7	2,0	4,0	6,0	7,0	6,0	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0
			vor Einbau	1,9	3	9	16	25	42	57	78	98	100	100
				530										
N	Kalkstein	0/5 mm	nach Nutzung oben	6,0	8	17	27	39	63	76	89	99	100	100
				624										
			Verfeinerung	4,1	5,0	8,0	11,0	14,0	21,0	19,0	11,0	1,0	0,0	0,0
			nach Nutzung unten	3,2	5	11	18	27	50	66	84	98	100	100
				562										
O	Grauwacke	0/5 mm	Verfeinerung	1,3	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0	9,0	6,0	0,0	0,0	0,0
			vor Einbau	3,3	3	4	7	13	33	57	78	98	100	100
				496										
			nach Nutzung oben	9,5	11	13	16	22	39	57	78	98	100	100
				544										
P	Diabas	0/5 mm	Verfeinerung	3,0	4,0	4,0	5,0	6,0	8,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
			nach Nutzung unten	6,3	7	8	12	19	41	59	79	98	100	100
				529										
			Verfeinerung	1,2	1,0	1,0	-1,0	-5,0	-9,0	-12,0	-11,0	-2,0	0,0	0,0
			vor Einbau	0,8	1	2	6	15	32	52	74	97	100	100
				480										
			nach Nutzung oben	6,4	11	13	19	26	47	60	81	100	100	100
				563										
			Verfeinerung	5,6	10,0	11,0	13,0	11,0	15,0	8,0	7,0	3,0	0,0	0,0
			nach Nutzung unten	2,0	2	3	5	10	23	40	63	95	100	100
				443										
			Verfeinerung	0,4	-1,0	-2,0	-8,0	-14,0	-15,0	-14,0	-14,0	-8,0	0,0	0,0
			vor Einbau	7,2	11	18	29	42	52	56	72	95	100	100
				582										
			nach Nutzung oben	7,6	10	16	21	28	37	42	58	87	100	100
				507										
			Verfeinerung	0,3	0,0	-2,0	-6,0	-10,0	-7,0	-5,0	-4,0	-2,0	0,0	0,0
			nach Nutzung unten	7,5	11	16	23	32	45	51	68	93	100	100
				547										
			Verfeinerung	0,3	0,0	-2,0	-6,0	-10,0	-7,0	-5,0	-4,0	-2,0	0,0	0,0

Tabelle 12: Wesentliche Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Feinanteile < 0,063 mm der Bettungsmaterialien

[L 7] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (Entwurfsstand 2022): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb von Flächen des Straßenverkehrs (ZTV Wegebau), FLL Verlag, Bonn

Verkehrswesen e. V. (2020): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen (ZTV Pflaster-StB 20), FGSV Verlag, Köln

[L 8] Dr. Voß, Karl-Uwe: Schäden an Flächenbefestigungen aus Betonpflaster – Teil 2: Frostschäden, gebundene Bauweise, oberflächenvergütete Produkte. 1. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018

[L 9] Dr. Voß, Karl-Uwe: Schäden an Flächenbefestigungen aus Betonpflaster – Teil 1: Ausblühungen, Kantenabplatzungen und Verfärbungen. 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019

[L 10] Dr. Voß, Karl-Uwe (08-2018): Verantwortlich-

keit für die Entstehung von Ausblühungen – Teil 1. BWI BetonWerk International, ad-media GmbH, Köln, Seite 76

[L 11] Dr. Voß, Karl-Uwe (10-2018): Verantwortlichkeit für die Entstehung von Ausblühungen – Teil 2. BWI BetonWerk International, ad-media GmbH, Köln, S. 90

[L 12] Dr. Voß, Karl-Uwe (05-2023): Pflasterflächen – Fugen und Bettung. Straße und Tiefbau, Giesel Verlag GmbH, Hannover, S. 26–32