

Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 54

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton

**OECD/JTRC Projekt
„Economic Evaluation of Long-Life
Pavements Phase II, Teil:
Zementgebundene Materialien“
(High Performance Cementitious Materials, HPCM)**

von

Nina Sliwa
Wolfgang Roßbach
Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach

Patrik Wenzl
Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 54

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 05.330:
Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton; dünne Fahrbahndeckschichten

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-86509-799-6

Bergisch Gladbach, März 2008

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton

Mit dem Ziel, die Verkehrssicherheit zu verbessern sowie den intermodalen Verkehr und die Nachhaltigkeit im Straßenbau zu fördern, legten im Jahr 2003 die OECD-Mitgliedsländer ein Verkehrsforschungsprogramm auf. In diesem Rahmen wurde das Projekt „Beurteilung der Wirtschaftlichkeit langlebiger Straßenbeläge“ initiiert. Phase I dieses Projektes beinhaltete dazu eine internationale Studie. Ein Ergebnis der Studie ist, dass der Einsatz langlebiger Deckschichten trotz anfänglich höherer Baukosten für stark beanspruchte Straßen aufgrund geringerer Unterhaltungsarbeiten und damit Verzögerungen für den Straßennutzer wirtschaftlich vorteilhaft sein können. Darüber hinaus konnten zwei Materialien gefunden werden, die sich derzeit in der Entwicklung befinden bzw. bisher in Kleinprojekten eingesetzt wurden, die den Anforderungen an eine langlebige Deckschicht genügen könnten – Epoxid-Asphalt und zementgebundene Hochleistungsmaterialien (HPCM).

Mit einer Phase II wurde die Eignung der beiden Materialien hinsichtlich ihrer Verwendung als langlebige Straßendeckschicht im Labor beurteilt. Dafür wurden zwei Projektgruppen gebildet. Die Projektgruppe zur Entwicklung des HPCM arbeitet unter der Leitung des französischen Forschungsinstitutes Laboratoire Central des Pontes et Chaussées. Teil dieses Berichtes sind die Untersuchungen der Oberflächeneigenschaften des HPCM, die von der BASt selbst durchgeführt bzw. in Auftrag gegeben wurden.

Für die Untersuchungen war es erforderlich, eigene HPCM-Probekörper herzustellen. Nach umfangreichen Vorversuchen mit dem angelieferten HPCM-Trockenmörtel sowohl mit als auch ohne Faserzugabe konnten Probeplatten mit der vorgegebenen Mörtelschichtdicke von 8 mm zielsicher hergestellt werden. Die von der OECD-Projektgruppe empfohlene Abstreutechnik der groben Gesteinskörnung wurde dahingehend modifiziert, dass wassergesättigte Gesteinskörner manuell aufgestreut und anschließend mit einer nicht klebenden Platte angedrückt worden sind. Dadurch konnte der Kornverlust an der Oberfläche deutlich reduziert werden.

Die Oberflächeneigenschaften und deren Verhalten unter den Einflüssen von Witterung und Verkehr wurden im Labor mit Hilfe des kombinierten Labor-Beanspruchungszyklus (TU München) sowie des Hybridmodells SperOn (Müller BBM) simuliert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Mikro- und Makrotextur hinsichtlich des zu erwartenden Griffigkeitsverhaltens der Oberfläche sehr gute Eigenschaften aufweisen. Wird jedoch die Gestalt der Oberfläche, die die akustischen Eigenschaften beeinflusst, mit betrachtet, so weist die Oberfläche eine ungünstige Gestalt auf. Die Eigenschaften der HPCM-Oberfläche sollten unter Berücksichtigung der Hinweise für geräuschreduzierende Oberflächengestaltungen, wie z. B. Reduzierung des Größtkorns oder Ausbildung der Oberfläche als Plateau mit Schluchten, weiter optimiert werden. Darüber hinaus ist das Verhalten der Oberfläche hinsichtlich des Kornverlustes und damit nicht weiter vorhandenen Griffigkeitspotenzials weiter zu untersuchen. Im Rahmen der Phase II werden großformatige Probeflächen mittels Rundlaufprüfanlagen in Frankreich und England untersucht. Die Ergebnisse könnten weiteres Optimierungspotenzial aufzeigen.

Der Abschluss des OECD-Projektes, Phase II, ist für Sommer 2007 geplant. Im Anschluss an die Phase II ist geplant, diese Ergebnisse sowie die dann verfügbaren Ansätze aus anderen EU-Projekten zu verknüpfen und einen langlebigen Straßenbelag im Originalmaßstab auf einer Versuchsstrecke zu erproben (Phase III).

Development of durable, thin concrete wearing courses

In 2003, the OECD member states initiated a traffic research programme aimed at improving traffic safety and at promoting intermodal traffic and sustainable road constructions. Within this framework, a project entitled "Evaluation of the Economic Viability of Durable Road Surfaces" was initiated. Phase I of this project consisted of an international study. One result of this study was that the use of durable wearing courses can be economically more advantageous, despite the higher initial construction costs for roads subject to

high traffic loads, because the maintenance costs are lower and there are fewer roadworks causing delays for road users. In addition, there are two materials currently being developed, which have thus far been used in small projects and fulfil the requirements for a durable wearing course: epoxide asphalt and cement-bound high-performance materials (HPCMs).

During Phase II, the suitability of the two materials with regard to their use as durable road wearing courses was assessed in a laboratory. To do this, two project groups were formed. The project group for the development of the HPCM is working under the auspices of the French research institute Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. An investigation of the surface characteristics of the HPCM, which are being carried out by the BAST itself and partially being contracted out, form part of this report.

HPCM test samples had to be produced for the investigations. After conducting extensive preliminary tests with the HPCM dry mortar supplied, both with and without the addition of fibres, test plates with the specified mortar layer thickness of 8mm were produced. The dispersion technique for coarse stone fractions, as recommended by the OECD project group, was modified so that water-saturated stone chips were manually distributed over the plates and subsequently pressed on, using a non-adhesive plate. This significantly reduced the loss of surface chips.

The surface properties, especially under the influence of weather and traffic, were simulated with the aid of the combined laboratory stress cycle (TU Munich) and the SperOn hybrid model (Müller BBM).

In summary it may be said that both the micro- and macro-texture were very good with regard to the grip properties of the surface. However, if the surface structure – which affects the acoustic properties – is also taken into account, the properties are less favourable. The properties of the HPCM surface should be further optimised, taking into account the information available with regard to noise-reducing surface structures, such as the reduction of the coarsest materials or using a plateau-shaped surface with grooves. In addition, the surface properties must be investigated in more detail with regard to the loss of roughness and thus a reduction in the grip potential. Within the

framework of Phase II, large-format test surfaces are investigated by means of rotating test systems in France and England. The results could reveal a further potential for optimisation.

The conclusion of the OECD project, Phase II, has been planned for the summer of 2007. It is planned that, subsequent to this Phase II, these results and the results of other EU projects will be linked, and that a durable road surface will be tested on a full-sized test track (Phase III).

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	7	5.4	Besonderheiten bei der Herstellung von Probeplatten unter Verwendung von Mörtel mit Faserzugabe	17
2	Arbeitsplan der HPCM Working Group	7	6	Untersuchung der Oberflächeneigenschaften	18
2.1	Arbeitsplan der BAST	8	6.1	Allgemeines	18
3	Voruntersuchungen am Mörtel	9	6.2	Abschätzung des Haftvermögens der Gesteinskörner in der Zementmatrix	18
3.1	Allgemeines	9	6.3	Untersuchungen mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus	19
3.2	Voruntersuchungen am Mörtel ohne Faserzugabe	9	6.3.1	Ablauf des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus	20
3.2.1	Mischanweisung und eigene Erfahrungen	9	6.3.2	Durchgeführte Messungen	20
3.2.2	Optimierung der Festigkeits-eigenschaften des Mörtels	11	6.3.3	Entwicklung der Oberflächeneigenschaften nach dem Laborbeanspruchungszyklus	22
3.2.3	Bestimmung des Luftporen-gehaltes	11	6.3.4	Zusammenfassende Bewertung	24
3.2.4	Bestimmung der Konsistenz	11	6.4	Berechnung der Geräusch-emission	25
3.3	Voruntersuchungen am Mörtel mit Faserzugabe	12	7	Zusammenfassung und Ausblick	25
3.3.1	Mischanweisung und eigene Erfahrungen	12	Literatur		27
3.3.2	Bestimmung der Konsistenz	13			
3.4	Zusammenfassung	13			
3.4.1	Herstellung des Mörtels ohne Faserzugabe	13			
3.4.2	Herstellung des Mörtels mit Faserzugabe	13			
4	Untersuchungen der groben Gesteinskörnung	14			
4.1	Allgemeines	14			
4.2	Bestimmung des Polierwiderstandes und Polierwertes	14			
4.3	Bestimmung des Frost-Widerstandes	14			
5	Herstellung der abgestreuten Probeplatten	15			
5.1	Applikation des Mörtels	15			
5.2	Applikation der Gesteinskörnung	16			
5.3	Nachbehandlung der Probeplatten	17			

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Jahr 2003 legten die OECD-Mitgliedsländer ein Verkehrsforschungsprogramm auf, mit dem Ziel, die Verkehrssicherheit zu verbessern sowie den intermodalen Verkehr und die Nachhaltigkeit im Straßenbau zu fördern. Im Rahmen dieses Forschungsprogramms wurde das Projekt „Beurteilung der Wirtschaftlichkeit langlebiger Straßenbeläge“ initiiert. Phase I dieses Projektes beinhaltete eine internationale Studie [1]. Es galt zu prüfen, ob bei stark beanspruchten Straßen die Kosten für Unterhaltungsarbeiten sowie die daraus entstehenden Beeinträchtigungen für den Straßennutzer den Einsatz von langlebigen Straßenbelägen wirtschaftlich rechtfertigen. Darüber hinaus wurden die derzeit verfügbaren Oberflächenmaterialien in Bezug auf die Entwicklung derartiger Beläge abgeschätzt. Bei der Analyse und deren vorläufiger Beurteilung langlebiger Deckschichten, die bisher nicht allgemein eingesetzt werden, wurden die Kosten, die Lebensdauer und die Unterhaltungsregelungen als erreichbare Sollwerte u. a. in einem Rechenbeispiel berücksichtigt.

Ein Ergebnis der Studie ist, dass der Einsatz langlebiger Deckschichten trotz anfänglich höherer Baukosten für stark beanspruchte Straßen aufgrund geringerer Unterhaltungsarbeiten und damit Verzögerungen für den Straßennutzer wirtschaftlich vorteilhaft sein können. Darüber hinaus konnten zwei Materialien gefunden werden, die sich derzeit in der Entwicklung befinden bzw. bisher in Kleinprojekten eingesetzt wurden, die den Anforderungen an eine langlebige Deckschicht genügen könnten – Epoxid-Asphalt und zementgebundene Hochleistungsmaterialien. In den USA kam Epoxid-Asphalt auf verschiedenen Brücken zum Einsatz. U. a. wurde im Jahr 1967 einer dieser Brückenbeläge in Kalifornien eingesetzt und zeigt bis heute gute Gebrauchseigenschaften. Die zementgebundenen Hochleistungsmaterialien (HPCM – High Performance Cementitious Materials) sind bisher nur in Laboruntersuchungen erprobt worden. Sie zeichnen sich durch hohe Druck- und Biegezugfestigkeiten aus.

Für einen langlebigen Straßenbelag sind jedoch neben der Deckschicht der gesamte Ober- und Unterbau von großer Bedeutung. Im Rahmen dieses OECD-Projektes wurde ausschließlich die Wirtschaftlichkeit von Deckschichten bewertet. Andere Projekte, z. B. im EU-Forschungsrahmenprogramm, beschäftigen sich derzeit mit der Beurtei-

lung von Straßenober- und unterbauten mit Ausnahme der Deckschicht.

Auf Basis der Ergebnisse dieser internationalen Studie (Phase I) wurde das o. g. Projekt mit einer Phase II fortgesetzt. Die Zielsetzung dieser Phase besteht darin, eine Einschätzung der tatsächlichen Kapazität der vorgenannten Materialien und damit deren Eignung für die Verwendung als langlebige Deckschicht sowohl durch herkömmliche als auch durch zeitraffende Laboruntersuchungen zu liefern. Darüber hinaus sollen Hinweise für die Herstellung solcher Deckschichten erarbeitet werden.

Im Anschluss an die Phase II ist geplant, diese Ergebnisse sowie die dann verfügbaren Ansätze aus den o. g. EU-Projekten zu verknüpfen und einen langlebigen Straßenbelag im Originalmaßstab auf einer Versuchsstrecke zu erproben.

Für die Phase II wurden zwei Projektgruppen gebildet. Die Projektgruppe zur Entwicklung des Epoxid-Asphaltes arbeitet unter Leitung des Forschungsinstitutes Turner-Fairbank Highway Research Center, die des HPCM unter der Leitung des französischen Forschungsinstitutes Laboratoire Central des Pontes et Chaussées.

Dieser Bericht stellt den Arbeitsplan der HPCM-Projektgruppe vor. Da das OECD-Projekt Phase II jedoch noch nicht abgeschlossen ist, werden in diesem Bericht ausschließlich die Ergebnisse der BAST-Untersuchungen dargestellt.

2 Arbeitsplan der HPCM Working Group

In der Projektgruppe zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit des High Performance Cementitious Material (HPCM) hinsichtlich der Anforderungen für den Straßenbau waren mit Frankreich (Laboratoire Central des Pontes et Chaussées – LCPC, federführend), Dänemark (Danish Road Institute – DRI, Dansk Beton Technik – DBT), England (Transport Research Laboratory – TRL, UK Highways Agency), Australien (Roads and Traffic Authority – RTA), USA (Turner-Fairbank Highway Research Center – FHWA) und Deutschland (Bundesanstalt für Straßenwesen – BAST) acht Forschungsinstitute bzw. Labore aktiv tätig. Die Ausgangsstoffe wurden von SIKA France geliefert. Einen Überblick über den gemeinsam entwickelten Arbeitsplan bietet Tabelle 1.

Nr.	Aufgabe	Labor
1	Auswahl der Inhaltsstoffe	LCPC, SIKA, DBT
2	Zusammensetzung des HPCM, Mischanweisung, Qualitätskontrolle	LCPC
3	Empfehlung für die Herstellung der Probekörper	LCPC
4	Orientierende Untersuchungen zur Spurrinnenbildung	LCPC
4'	Finite-Elemente-Modellierung des Spannungsverhaltens in der Verbundzone	DBT
4''	Analytische Berechnung des Kickens bei Verbundlösung	LCPC
5	Orientierende Untersuchungen zur Rissentwicklung (6-m-Streifen)	LCPC
6	Untersuchungsserien zur Rissentwicklung (Variation der Faserarten und -mengen)	LCPC
7	Ermüdungsverhalten des HPCM	DBT
8	Verhalten bei kalten Temperaturen (Frost-Tausalz-Widerstand)	DRI
8'	Final Mix-Design and HPCM Application Procedure	LCPC
9	Bestimmung des Polierwiderstandes	BASt
10	Oberflächenbeständigkeit bei Verkehrsbeanspruchung (Großversuch)	LCPC
11	Laborbeanspruchungszyklus der Oberfläche durch mechanischen, chemischen und klimatischen Angriff	BASt, TUM
12	Berechnung der Geräuschemission	BASt, Müller BBM
13	Mechanischer Widerstand gegenüber Verkehrsbeanspruchungen bei normalen und hohen Temperaturen	TRL
14	Rissentwicklung im Großversuch	LCPC, RTA
15	Untersuchung des Abriebwiderstandes	FHWA

Tab. 1: Arbeitsplan der HPCM-Projektgruppe

Auf Basis französischer Erfahrungen wurde beschlossen, bei der Herstellung der Probekörper eine Schichtdicke des HPCM von rund 8 mm anzustreben. Als Unterlage wurde eine herkömmliche Asphaltsschicht ausgewählt, die jedoch zwecks Verbund vor der Applikation des Mörtels aufgeraut werden sollte.

Um den HPCM mit einer dem Straßenbau anforderungsgerechten Textur zu versehen, war die Zementoberfläche mit einer Gesteinsart abzustreuen, die ihre Eigenschaften unter den Einflüssen von Wetter und Verkehr möglichst lange beibehält. Aufgrund von Erfahrungen mit Abstreuerungen auf Epoxidharzbeschichtungen wurde dafür ein Bauxit ausgewählt.

2.1 Arbeitsplan der BASt

Die Aufgaben der BASt (Tabelle 1, Nr. 9, 11, 12) dienen der Erfassung und Bewertung der Oberflächeneigenschaften Griffigkeit und Reifen/Fahrbahn-Geräusch sowie wenn möglich deren Entwicklung unter den Einflüssen von Witterung und Verkehr. Von der BASt selbst wurden neben den

Untersuchungen zur Haftung der groben Gesteinskörnungen in der Mörtelmatrix, die Prüfung zum Polierwert nach DIN 1097-8 [2] und zum Polierwiderstand nach dem Verfahren WEHNER/SCHULZE [3] durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Berechnung der Geräuschemissionen der Oberfläche mit dem Hybrid-Modell „SperOn“ [4, 5] und die Beurteilung der Entwicklung der Oberflächeneigenschaften mit dem Laborbeanspruchungszyklus der Technischen Universität München [6] in Auftrag gegeben.

Sowohl für die Bestimmung des Polierwiderstandes als auch für den Laborbeanspruchungszyklus war es erforderlich, eigene Probekörper herzustellen. Mit der OECD-Projektgruppe war vereinbart, dass alle Institute, die eigene Probekörper herstellen, alle Ausgangsstoffe aus einer Charge der SIKA France – Laboratoire in Gournay en Bray beziehen, um Materialschwankungen auszuschließen. Die Versuchsmaterialien wurden der BASt auf einer Palette in Folie eingeschweißt angeliefert. Nichtsdestotrotz waren Voruntersuchungen zur Probekörperherstellung und zu den Mörteleneigenschaften im Rahmen der eigenen Qualitätskontrolle unabdingbar.

3 Voruntersuchungen am Mörtel

3.1 Allgemeines

Seitens des LCPC wurde die Rezeptur für den HPCM entwickelt. Alle Institute bezogen die bereits entsprechend Tabelle 2, (1) bis (5), zusammengesetzten Ausgangsstoffe für den Mörtel als Trockenmisch in 25-kg-Säcken. Die zuzugebenden Fasern, die Gesteinskörnungen sowie weitere Betonzusatzmittel in Kleinmengen wurden separat angeliefert.

Für die eigene Qualitätskontrolle waren die in Tabelle 3 dargestellten Festmörteleigenschaften sowohl an 40 x 40 x 160 mm Mörtelprismen und 100er [mm] Würfeln als auch Frischmörteleigenschaften anzustreben (Tabelle 3).

In den Voruntersuchungen wurden zunächst das Mischen und das Applizieren des Mörtels mit und ohne Faserzugabe erprobt. Anhand der dadurch erzielten Frisch- und Festbetonkennwerte sollte ggf. die vorgegebene Mischanweisung entsprechend der eigenen Erfahrungen modifiziert werden.

3.2 Voruntersuchungen am Mörtel ohne Faserzugabe

3.2.1 Mischanweisung und eigene Erfahrungen

Gemäß der Empfehlung zur Herstellung der Probekörper (Tabelle 1, Nr. 2, 3) ist der Mörtel im Verhältnis von 2.056 kg/m³ Trockenmörtel zu 198 kg/m³ Wasser mit zwei Mischgeschwindigkeiten in einem 2-Liter-Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 [7] herzustellen. Die Mischgeschwindigkeit bei Stufe I beträgt 140 U/min und die bei Stufe II 285 U/min. Die für die Untersuchungen in der BAST erforderliche Probemenge beträgt rd. 1.600 g. Die Probemischungen wurden auf diese Menge abgestimmt.

Beim Mischen waren die unten aufgelisteten Vorgaben einzuhalten. T_0 ist der Zeitpunkt des Mischbeginns.

- Trockenmörtel- und Wassermenge wiegen, Mischtrog mit feuchtem Schwamm auswischen,
- Zeitpunkt $T_0 + 1$ Minute mit langsamer Mischgeschwindigkeit (Stufe I) das Premix trocken mischen,

Stoffkomponente	Spezifikation (Hersteller)	Menge je kg/m ²
(1) Sand, > 0,1 mm	0,2/1 mm (Fontainebleau (F))	432
(2) Feiner Sand, < 0,1 mm	0,08/0,315 mm (Fontainebleau (F))	432
(3) Portlandzement CEM I, Weißzement	CPA-CEM I 52,5 CP2 „blanc“ (LaTeil (F))	991
(4) Mikrosilika (trocken)	98,3 % SiO ₂ ; 0,4 % C u. v. m. (F)	198
(5) Fließmittel als Trockenpulver	Polycarbonacrylat (SIKA (F))	2,93
Verögerer	SIKA (F)	4,95
Verflüssiger	SIKA (F)	1,49
Kunststofffasern	15/0,33 mm; Zugfestigkeit: 1.000 N/mm ² (Kuralon)	1 %/4 %
Stahlfasern	13/0,20 mm, R _m > 2.000 N/mm ² (F)	
Bauxit als Abstreumaterial	3/7 mm (Portalum (China))	

Tab. 2: Zusammensetzung des werkseitig vorgemischten Trockenmörtels (Premix)

	Druckfestigkeit [N/mm ²]		Biegezugfestigkeit [N/mm ²]		Luftporengehalt [Vol.-%]	Setzmaß [cm]
	Nach 7 d	Nach 28 d	Nach 7 d	Nach 28 d		
Mörtel ohne Faserzugabe (nur Prismen)	110	123,7	19,9	22,4		11,5
Mörtel mit 1 % Faserzugabe					5,8	14,0
	Prismen	172,0		23,5		
	Würfel	145,7				

Tab. 3: Anzustrebende Frisch- und Festmörteleigenschaften

- innerhalb von 30 Sekunden bis $T_0 + 1,5$ Minuten während des Mischens das Wasser zugeben,
- von $T_0 + 1,5$ Minuten bis $T_0 + 2,5$ Minuten mit Stufe I mischen,
- Mischgeschwindigkeit auf Stufe II einstellen. Vom Zeitpunkt $T_0 + 2,5$ Minuten bis 5 Minuten mit hoher Mischgeschwindigkeit (Stufe II) mischen.

Mit dem o. g. Mischungsverhältnis und diesem Mischregime blieb der Mörtel trocken. Durch stufenweise Wasserzugabe konnte mit etwa der 3fachen Wassermenge ein pastöser, gut verarbeitbarer Mörtel hergestellt werden. Schlussendlich betrug das Verhältnis Trockenmörtel 1.600 g/Wasser

231 g. Beim Mischvorgang wurde beobachtet, dass der scheinbar trockene Mörtel schlagartig nach etwa 4 Minuten Mischzeit plastisch wurde. Dieses lässt sich auf die Anregung des Fließmittels durch den Energieeintrag zurückführen.

Für die Bestimmung der Frischmörtelkennwerte und die Herstellung der Würfel waren größere Mörtelmengen herzustellen. Aufgrund der dafür notwendigen Probemengen wurde ein leistungsstärkerer, jedoch nur manuell steuerbarer Mischer mit einem 20-Liter-Mörteltrog verwendet. Nach einigen Vorversuchen konnte das o. g. Mischregime auf diesen in Bild 2 dargestellten Mischer übertragen werden. Die Kalibrierung des mit diesem Mischer hergestellten Mörtels erfolgt an den vorgegebenen Festbetonmörtelwerten (Tabelle 3).



Bild 1: Mörtelmischer DIN EN 196-1 [6]

Aufbauend auf den Erfahrungen zur Verarbeitbarkeit des Mörtels mit dem kleinen Mischer (Bild 1) wurden zunächst Mörtelmischungen mit den o. g. Mischungsverhältnissen hergestellt. Durch den veränderten Energieeintrag konnte die Wasserzugabe jedoch wieder reduziert werden. Die beste Verarbeitbarkeit des Mörtels konnte mit einem Verhältnis von 1.600 g/180 g erzielt werden.

Mit diesen beiden Mischungsverhältnissen (Trockenmörtel/Wasser), die gut verarbeitbar waren,

I. 1.600 g/231 g; Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 und

II. 1.600 g/180 g; größerer Mörtelmischer,

wurden Probekörper zur Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit nach [6] hergestellt. Die Verdichtung der Mörtelprismen erfolgte auf dem Vibrationsstisch mit einer Frequenz von 50 Hz und einer Schwingbreite von 0,75 mm. Die Verdichtungsdauer betrug 120 Sekunden. Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen zusammen.

Es zeigt sich, dass die Festigkeitseigenschaften beider Mischungen die Vorgaben gemäß Tabelle 3 nicht erreichen, wobei Mischung I die Anforderun-



Bild 2: Leistungsstärkerer Mörtelmischer

Mischungen	Prüfalter [d]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
I	7	80,7	13,2
I	28	100,4	15,9
II	7	109,4	19,0
II	28	-	-

Tab. 4: Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mischungsverhältnisse mit guter Verarbeitbarkeit

gen unter- und Mischung II sie überschreitet. Daher war es notwendig, die Mörtleigenschaften weiter zu optimieren.

3.2.2 Optimierung der Festigkeitseigenschaften des Mörtels

Mit diesen Erkenntnissen wurden die Mischungsverhältnisse des Mörtels sowohl am kleinen (Mischer I) als auch am großen Mischer (Mischer II) variiert und von jeder Variante Probekörper zur Festigkeitsprüfung hergestellt. Im Folgenden sind die einzelnen Mischungsvarianten (Trockenmörtel/Wasser), die alle gut bis sehr gut verarbeitbar waren, aufgelistet:

- Ia. 1.600 g/198 g,
- Ib. 1.600 g/200 g,
- IIa. 1.700 g/192 g,
- IIb. 1.600 g/200 g.

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen nach [6] sowie die Anforderungen nach Tabelle 3 zeigt Tabelle 5.

Für weitere Untersuchungen der Mörtleigenschaften wurde die Mischung Ib mit dem Mischungsverhältnis 1.600 g/200 g, da diese im Vergleich die beste Verarbeitbarkeit aufwies.

3.2.3 Bestimmung des Luftporengehaltes

Der Luftporengehalt wurde nach dem Druckausgleichsverfahren gemäß DIN EN 1015-7 [8] bestimmt. Aufgrund der erforderlichen Prüfmenge wurde für die Herstellung des Frischmörtels der Mischer II (Mischung IIb) verwendet.

Der mittlere Luftporengehalt beträgt 9,2 Vol.-%. Bild 3 zeigt den Luftporentopf.

3.2.4 Bestimmung der Konsistenz

Die Bestimmung der Konsistenz des Frischmörtels erfolgt in Anlehnung an DIN EN 12350-2 [9]. Die Herstellung des Frischmörtelkegels zeigt Bild 4. Es wurde ein durchschnittliches Setzmaß von 8 cm ermittelt. Der Frischmörtel ist in die Setzmaßklasse S2 einzustufen, was einer steiferen Konsistenz im Vergleich zu den Anforderungen nach Tabelle 3 entspricht. Auch in den anderen Laboren der OECD-Gruppe wurde mit dem gelieferten Trockenmörtel die steifere Konsistenz ermittelt.

Mischungen	Prüfalter [d]	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	
		Vorgabe [N/mm ²]	[N/mm ²]	Vorgabe [N/mm ²]	[N/mm ²]
Ia	7	110	106,5	19,9	18,3
Ib	2	-	80,5	-	13,3
	7	110	102,0	19,9	17,5
	28	123,7	120,9	22,4	21,0
IIa	7	110	116,6	19,9	17,3
IIb	1	-	69,8	-	6,1

Tab. 5: Prismenfestigkeiten der verschiedenen Mörtelvarianten



Bild 3: Luftporenmessung des Mörtels



Bild 4: Herstellung des Frischmörtelkegels zur Setzmaßbestimmung

3.3 Voruntersuchungen am Mörtel mit Faserzugabe

3.3.1 Mischanweisung und eigene Erfahrungen

Für die Herstellung der Probekörper mit Faserzugabe ist gemäß den Empfehlungen der OECD-Projektgruppe (Tabelle 1, Nr. 2, 3) der Mörtelmischer nach [7] zu verwenden. Darüber hinaus kam wie bei den Voruntersuchungen am Mörtel ohne Fasern der leistungsstärkere Mischer II zur Anwendung.

Im Rahmen der französischen Untersuchungen zur Rissentwicklung des HPCM (Tabelle 1, Nr. 5, 6) sind auf dem Freigelände des LCPC 6 m lange Mörtelstreifen mit verschiedenen Stahl- und Kunststofffasermengen (0 % bis 3 %) hergestellt worden. Die geringste Rissanzahl im Mörtel und damit einhergehende Verbundlösungen waren auf dem Streifen mit rd. 3 % Stahlfaseranteil zu verzeichnen. Tendenziell zeigte sich jedoch auch, dass bei höherer Dosierung der Kunststofffasern die Rissanzahl deutlich reduziert werden kann. Aufgrund der besseren Verarbeitbarkeit des Mörtels mit Kunststofffasern wurden weitere Mörtelstreifen mit 3-5 % Kunststofffaseranteil hergestellt. Seitens der OECD-Projektgruppe wurde im Verlauf des Projektes für die weiteren Untersuchungen der anderen Laboratorien eine Mörtelmischung mit 4 % Kunststofffaseranteil empfohlen.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurden die ursprüngliche Mischanweisung und das Mischungsverhältnis modifiziert (Tabelle 1, Nr. 8).

Beim Mischen waren die unten angegebenen Vorgaben einzuhalten. Dabei ist T_0 der Zeitpunkt des Mischbeginns:

- Trockenmörtel, Wasser, Verflüssiger und Fasern abwiegen, Mischtrog mit feuchtem Schwamm auswischen,

- Zeitpunkt $T_0 + 1$ Minute mit langsamer Mischgeschwindigkeit (Stufe I) das Premix mit dem Verflüssiger trocken mischen,
- innerhalb von 30 Sekunden bis $T_0 + 1,5$ Minuten während des Mischens das Wasser zugeben,
- von $T_0 + 1,5$ Minuten bis $T_0 + 2,5$ Minuten mit Stufe I mischen,
- Mischgeschwindigkeit auf Stufe II einstellen. Von Zeitpunkt $T_0 + 2,5$ Minuten bis 4 Minuten mit hoher Mischgeschwindigkeit (Stufe II) mischen,
- Mischer abstellen und bis $T_0 + 4$ Minuten 15 Sekunden die Fasern begeben,
- von Zeitpunkt $T_0 + 4$ Minuten 15 Sekunden bis 5 Minuten mit hoher Mischgeschwindigkeit (Stufe II) mischen.

Mit diesem Mischregime und folgenden Mischungsverhältnissen (Trockenmörtel/Wasser) wurden die Probekörper für die Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit zur eigenen Qualitätskontrolle hergestellt:

- I. 1.600 g/200 g/20 g Kunststofffasern – (Mischer I),
- Ila. 1.600 g/150 g/1,29 % v. T. Verflüssiger (20,7 g)/10 g Kunststofffasern – (Mischer II),
- Ilb. 1.634 g/182 g/0,07 % v. T. Verflüssiger (1,19 g)/0,25 % v. T. Verzögerer (3,96 g)/41,4 g

Mischungen	Prüfalter	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	
		Vorgabe		Vorgabe	
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
I	2	-	83,8	-	12,3
Ila	2	-	70,3	-	10,3
Ilb	2	-	91,6	-	19,6
	28	172	151,5	23,5	19,4

Tab. 7: Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelvarianten mit Faserzugabe

Stoffkomponente	Spezifikation (Hersteller)	Menge je kg/m ³
(1) Trockenmörtel (inkl. Sand, Zement, Mikrosilika und Verflüssiger)	SIKA (F)	2.043,0
(2) Verflüssiger (Trockenpulver)	SIKA (F)	1,49
(3) Verzögerer (flüssig)	SIKA (F)	4,95
(4) Kunststofffasern (PVA), 4 Vol.-%	15/0,33 mm; Zugfestigkeit: 1.000 N/mm ² (Kuralon)	52,0
(5) Wasser		202,0

Tab. 6: Modifizierte Mörtelmischung resultierend aus den Erfahrungen des LCPC

Kunststofffasern (Vorgabe gemäß Tabelle 6) – (Mischer II).

Die Verdichtung der Mörtelprismen erfolgte auf dem Vibrationstisch mit einer Frequenz von 50 Hz und einer Schwingbreite von 0,75 mm. Die Verdichtungsdauer betrug 120 Sekunden. Tabelle 7 fasst die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen zusammen.

3.3.2 Bestimmung der Konsistenz

Die Bestimmung der Konsistenz der Mörtelmischung IIb erfolgt in Anlehnung an DIN EN 12350-2 [9] wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben. Dabei wurde ein durchschnittliches Setzmaß von 20 cm ermittelt und ist in die Setzmaßklasse S1 einzustufen. Der Frischmörtel ist damit im Vergleich zu den Anforderungen gemäß Tabelle 3 weicher.

3.4 Zusammenfassung

Aus den Erkenntnissen der Voruntersuchungen ergeben sich folgende Mischungszusammensetzungen und Mischanweisungen zur Herstellung des HPCM im Labor.

3.4.1 Herstellung des Mörtels ohne Faserzugabe

Die für die Probekörper erforderliche Mörtelmenge ist im Mischungsverhältnis

- 2.056 kg/m² (1.600 g) Trockenmörtel zu
- 198 kg/m² (200 g) Wasser

in einem 2-Liter-Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 [7] herzustellen. Für größere Mengen ist ein leistungsstärkerer Mischer mit gleichem Mischungsverhältnis zu verwenden.

Das nachfolgende Mischregime sollte eingehalten werden. Dabei ist T_0 der Zeitpunkt des Mischungsbegins. Die langsame Mischgeschwindigkeit bei Stufe I beträgt 140 U/min und die hohe Mischgeschwindigkeit bei Stufe II beträgt 285 U/min:

- Trockenmörtel- und Wassermenge wiegen, Mischtroge mit feuchtem Schwamm auswischen,
- Zeitpunkt $T_0 + 1$ Minute mit langsamer Mischgeschwindigkeit (Stufe I) das Premix trocken mischen,

- innerhalb von 30 Sekunden bis $T_0 + 1,5$ Minuten während des Mischens das Wasser zugeben,
- von $T_0 + 1,5$ Minuten bis $T_0 + 2,5$ Minuten mit Stufe I mischen,
- Mischgeschwindigkeit auf Stufe II einstellen. Vom Zeitpunkt $T_0 + 2,5$ Minuten bis 5 Minuten mit hoher Mischgeschwindigkeit (Stufe II) mischen.

3.4.2 Herstellung des Mörtels mit Faserzugabe

Die für die Probekörper erforderliche Mörtelmenge ist im Mischungsverhältnis (Tabelle 6)

- 1.634 g Trockenmörtel,
- 181,4 g Wasser,
- 0,07 % v. T. Verflüssiger (1,19 g),
- 0,25 % Verzögerer (3,96 g, im Wasser lösen),
- 41,4 g Kunststofffasern

im leistungsstärkeren Mischer herzustellen.

Das nachfolgende Mischregime sollte eingehalten werden. Dabei ist T_0 der Zeitpunkt des Mischungsbegins. Die langsame und die hohe Mischgeschwindigkeit müssen auf den Energieeintrag des Mixers gemäß DIN EN 196-1 [7] abgestimmt sein.

- Trockenmörtel, Wasser, Verflüssiger und Fasern abwiegen, Mischtroge mit feuchtem Schwamm auswischen,
- Zeitpunkt $T_0 + 1$ Minute mit langsamer Mischgeschwindigkeit (Stufe I) das Premix mit dem Verflüssiger trocken mischen,
- innerhalb von 30 Sekunden bis $T_0 + 1,5$ Minuten während des Mischens das Wasser zugeben,
- von $T_0 + 1,5$ Minuten bis $T_0 + 2,5$ Minuten mit Stufe I mischen,
- Mischgeschwindigkeit auf Stufe II einstellen. Von Zeitpunkt $T_0 + 2,5$ Minuten bis 4 Minuten mit hoher Mischgeschwindigkeit (Stufe II) mischen,
- Mischer abstellen und bis $T_0 + 4$ Minuten 15 Sekunden die Fasern begeben,
- von Zeitpunkt $T_0 + 4$ Minuten 15 Sekunden bis 5 Minuten mit hoher Mischgeschwindigkeit (Stufe II) mischen.

4 Untersuchungen der groben Gesteinskörnung

4.1 Allgemeines

Als Gesteinsart wurde von der Projektgruppe Bauxit mit der Korngruppe 3/7 mm ausgewählt. Bauxit ist ein amorphes Sedimentgestein, welches bei der Verwitterung in semiariden oder semihumiden Klimaten aus tonhaltigen Silikatsteinen entsteht. Sein chemischer Hauptbestandteil ist Aluminiumoxid und daher ist Bauxit der wichtigste Rohstoff zur Aluminiumgewinnung. Bauxit zeichnet sich in Abhängigkeit vom Gewinnungsgebiet sowohl durch eine hohe Festigkeit als auch eine hohe Polierresistenz aus. Im Betonstraßenbau in Deutschland kam Bauxit bisher als Abstreifung von Reaktionsharzbeschichtungen im Gemisch mit anderen Gesteinsarten, wie z. B. Granit, zum Einsatz.

Bei dem angelieferten Bauxit aus einem Gewinnungsgebiet in Nordchina handelt es sich um ein weißgelbliches Gestein, welches etwa mit 10 M.-% grauen bis dunkelroten Körnern vermischt ist. Die Bruchflächen sind glatt und kantig.

Im Rahmen der von der BAST durchgeführten Untersuchungen wurden der Polierwert (PSV) sowie der Polierwiderstand nach WEHNER/SCHULZE (PWS) bestimmt.

Bei der Herstellung der Probekörper für die Untersuchungen nach WEHNER/SCHULZE im Matrix-Eingussverfahren wurde festgestellt, dass es sich bei dem Bauxit um ein offenporiges Gestein handelt. Die Randbereiche des Gesteinskorns wiesen im Besonderen bei den weißgelblichen Körnern eine dunkle Verfärbung auf (Bild 5), die auf das bei

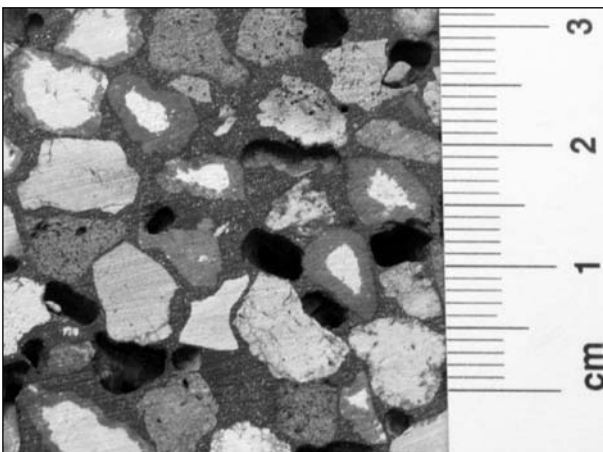


Bild 5: Mit dem Matrix-Eingussverfahren hergestellter Probekörper für die Wehner/Schulze-Untersuchungen

der Probekörperherstellung verwendete Bitumen zurückzuführen ist. Aufgrund dessen wurde neben den oben genannten Versuchen die Bestimmung des Frost-Widerstands durchgeführt.

4.2 Bestimmung des Polierwiderstandes und Polierwertes

Der Polierwert wurde gemäß DIN EN 1097-8 [2] an der Körnung 8/10 mm bestimmt. Der PSV-Wert beträgt 65, was einem sehr hohen Polierwiderstand entspricht.

Der Widerstand gegen Polieren nach WEHNER/SCHULZE wurde in Anlehnung an die TP Min-StB, Teil 5.5.2. geprüft [3]. Üblicherweise werden diese Untersuchungen an der Korngröße 2/5 mm oder 5/8 mm durchgeführt. Abweichend wurde die Lieferkörnung als Prüfkorngröße genutzt und die Anzahl der Überrollungen von 90.000 auf 270.000 erhöht. Diese Anzahl an Überrollungen gilt für Straßen der Bauklasse SV mit besonderen Polierbeanspruchungen, in die der abgestreute HPCM-Belag einzustufen wäre. Der PWS-Wert nach 270.000 Überrollungen beträgt 0,612. Nach [10] wurde für diese Straßenkategorie ein Richtwert von 0,46 ermittelt. Dieser wird von dem Bauxit deutlich überschritten. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich durch die Abweichung in der Prüfkorngröße kein relevanter Unterschied im PWS-Wert zur vorgeschriebenen Prüfkorngröße ergibt.

Beide Prüfungen zum Polierverhalten des Bauxites weisen auf einen hohen Widerstand gegen Abrieb durch Verkehr hin, was dem geplanten Anwendungsgebiet mit extrem hoher Verkehrsbelastung und langer Liegedauer mit geringem Erhaltungsaufwand entspricht.

4.3 Bestimmung des Frost-Widerstandes

Der Nachweis eines ausreichenden Frost-Widerstandes der Gesteinskörnung erfolgt zunächst durch die Bestimmung der Wasseraufnahme. Wird eine Wasseraufnahme $> 0,5$ M.-% ermittelt, ist zusätzlich der Frost-Widerstand zu bestimmen [11].

Die Bestimmung der Wasseraufnahme wurde gemäß DIN EN 1097-6 [12] an der Kornklasse 5/8mm durchgeführt und ergab 3,12 M.-%. Bei der anschließenden Frost-Tau-Wechselprüfung nach DIN EN 1367-1 [13] an der Lieferkörnung 3/7 mm



Bild 6: Schrumpfen des Mörtels durch wassersaugende Gesteinskörnung

wurden nur unbedeutende Absandungen festgestellt. Trotz eines hohen Wasseraufnahmevermögens ist das Gestein frostbeständig.

Das Wasseraufnahmevermögen des Bauxites zeigte sich auch nach dem Aufbringen der Gesteinkörner auf die Zementoberfläche (Kapitel 5). Beim Eindrücken der Körner in den frischen Mörtel entziehen diese dem Mörtel einen Teil des notwendigen Wassers für die vollständige Hydratation. Optisch ist ein Schrumpfen des Mörtels in unmittelbarer Umgebung eines Kornes sichtbar, hinzu kommt eine dadurch bedingte nicht ausreichende Haftung in der Mörtelschicht. Das Entziehen des Wassers aus dem Mörtel durch die porösen Körner zeigt die Detailaufnahme in Bild 6.

5 Herstellung der abgestreuten Probepplatten

5.1 Applikation des Mörtels

Die Empfehlungen zur Herstellung der HPCM-Probekörper sehen eine Gesamtschichtdicke vom 8 mm bei einer Abstreumenge von 4 kg/m^2 Bauxit vor.

Als Unterlage wurde seitens der BAST Asphaltbeton ausgewählt. Um ein gleichmäßiges Applizieren des Mörtels auf der Asphaltbetonplatte zu gewährleis-

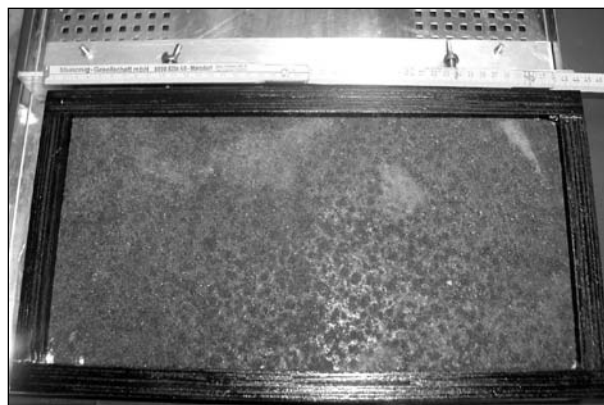


Bild 7: Asphaltbetonplatte mit Holzrahmen



Bild 8: Applizieren des Mörtels auf die Asphaltplatte



Bild 9: Abziehen der Mörteloberfläche mit breitem Spachtel

ten, wurde ein abnehmbarer Holzrahmen angefertigt, der mit Klemmvorrichtungen seitlich und höhenmäßig fixiert worden ist (Bild 7).

Der Mörtel wird mittels eines ca. 25 cm breiten Spachtels gleichmäßig auf die Unterlage aufgebracht (Bild 8) und durch langsames sägezahnartiges Abziehen ebenflächig verteilt (Bild 9). Die seitlichen Distanzstreifen werden anschließend vor-

sichtig entfernt und überschüssiger Mörtel von den Rändern feucht abgewischt.

In Vorversuchen wurde festgestellt, dass nur mit dem Einsatz von seitlichen Distanzstreifen die geforderte Gesamtschichtdicke zielsicher eingehalten werden konnte. Das Aufstreuen der Gesteinskörnung führt zu Materialverdrängung, sodass die Gesamtschichtdicke ohne die Ausdehnungsmöglichkeit durch die Distanzstreifen stets überschritten worden war.

5.2 Applikation der Gesteinskörnung

Gemäß den Empfehlungen zur Herstellung der Probekörper (Tabelle 1) sollte die trockene Gesteinskörnung (Bauxit 3/7, 4 kg/m²) gleichmäßig durch Aufstreuen auf ein klebendes Aluminiumblech und anschließendes Einpressen in frischen Mörtel appliziert werden. Ziel war es, eine möglichst gleichmäßige Einbettung des Gesteinskorns im Frischmörtel bis etwa zur Hälfte zu erreichen.

Dazu wurde ein 4 mm dickes Aluminiumblech mit zwei Griffen versehen und den Abmessungen der Probekörper angepasst. Im ersten Versuch wurde dieses vollständig mit Doppelklebeband versehen und auf der klebenden Fläche der Bauxit in der vorgegebenen Menge aufgestreut (Bild 10, Bild 11).

Etwa 80 % der aufgestreuten Gesteinsmenge blieben im Frischmörtel haften. Aufgrund der ausgewählten Körnung 3/7 mm konnte mit diesem Verfahren eine Einbindung des einzelnen Gesteinskorns bis zur Hälfte nur bedingt erreicht werden. Bei zu hohem Anpressdruck der Aluminiumplatte versanken die einzelnen Körner im Frischmörtel. Daher wurde die Abstreutechnik weiter optimiert. Über den Austausch der Aluminiumplatte gegen ein elastisches Trägermaterial zur Applikation konnte im Frischmörtel haftende Gesteinsmenge nicht erhöht werden.

Die besten Ergebnisse wurden in weiteren Versuchen durch einen gleichmäßigen händischen Auftrag der definierten Gesteinsmenge erzielt (Bild 12). Es ist darauf zu achten, dass die Gesteinskörnung nicht übereinanderliegen und die Körner voneinander etwa den gleichen Abstand haben. Anschließend werden die einzelnen Körner mit der Aluminiumplatte durch gleichmäßiges Aufdrücken in die Mörtelschicht eingepresst (Bild 13).



Bild 10: Bauxit (4 kg/m²) auf einer klebenden Aluminiumplatte



Bild 11: Aufbringen des Abstreumaterials



Bild 12: Gleichmäßiges Aufstreuen der Gesteinskörnung mit Hand

Um die Haftung der Körner im Mörtel quantitativ abzuschätzen zu können, wurde nach dem Ausschalen der Probekörper (nach 24 h) die Oberfläche mit einem Kokoshandfeger 3-mal abgekehrt und dabei der Verlust der Körner aufgenommen. Das Abkeh-



Bild 13: Eindrücken der Körner in die Mörtelschicht mit einer Aluminiumplatte

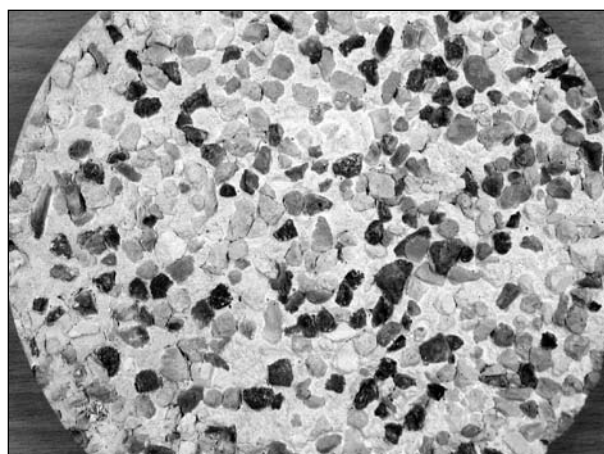


Bild 16: Abgestreute Probepplatten mit feuchter Gesteinskörnung

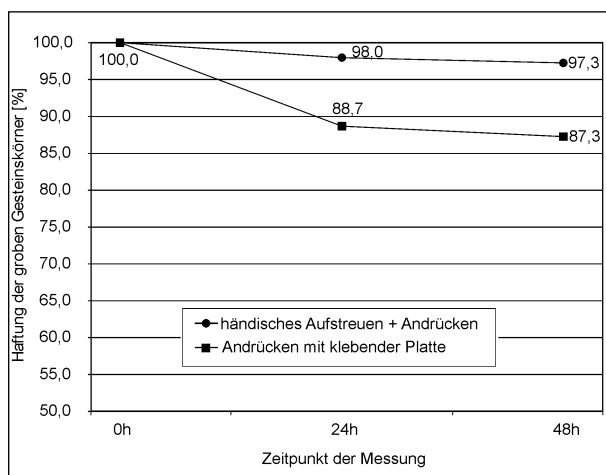


Bild 14: Verlust der groben Gesteinskörner



Bild 15: Abgestreute Probepplatten mit trockener Gesteinskörnung

ren wurde nach 48 h wiederholt. Die Ergebnisse sind in Bild 14 dargestellt.

An den hergestellten Probekörpern konnte augenscheinlich ein Schrumpfen des Mörtels rund um ein

Gesteinskorn festgestellt werden (Bild 6), was auf das Wasseraugvermögen des Gesteins zurückzuführen war. Daher wurde für die Applikation weiterer Mörteloberflächen 24h-wassergesättigte Gesteinskörnungen (Kapitel 6.2) verwendet. Anschließend konnten durch Abkehren keinerlei Körner mehr entfernt werden. Die fertig gestellten Oberflächen sowohl mit trockener als auch mit feuchter Gesteinskörnung abgestreut zeigen die Bilder 15 und 16.

5.3 Nachbehandlung der Probepplatten

Die Probepplatten lagerten 24 h im Feuchteschrank bei 20 ± 2 °C sowie mindestens 95 % relativer Luftfeuchtigkeit, mit einer Aluminiumplatte und zusätzlich mit einem feuchten Tuch bedeckt. Danach wurde die Aluminiumplatte entfernt, die seitliche Holzschalung demontiert und die Probepplatte noch weitere 7 Tage mit feuchten Tüchern nachbehandelt. Anschließend lagerten sie bis zu ihrer weiteren Verwendung im Raumklima.

5.4 Besonderheiten bei der Herstellung von Probepplatten unter Verwendung von Mörtel mit Faserzugabe

Die bei Herstellung der Probepplatten verwendete Mörtelzusammensetzung ist in Kapitel 3.4.2 beschrieben. Die Applikation des Mörtels mit Faseranteil und der Gesteinskörnung sowie die Nachbehandlung erfolgten analog zur Herstellung der Probepplatten mit einer Mörtelzusammensetzung ohne Faseranteil.

Durch den Faseranteil wurde die Verarbeitbarkeit des Mörtels herabgesetzt. Dadurch konnte nicht vermieden werden, dass beim Glattstreichen der Mörtelschicht mit dem Spachtel leichte Wellen in die Oberfläche eingeprägt wurden. Darüber hinaus erschwerten die Fasern ein gleichmäßiges Eindringen der einzelnen Körner in den frischen Mörtel.

6 Untersuchung der Oberflächeneigenschaften

6.1 Allgemeines

Neben selbst durchgeführten Untersuchungen zur Haftung der groben Gesteinskörner in der Zementmatrix wurden die Beanspruchung der fertig gestellten HPCM-Oberfläche mit einem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus, der die Einflüsse von Witterung und Verkehr simuliert, und die Ermittlung der Geräuschemissionen mit einem statistischen Berechnungsmodell in Auftrag gegeben.

6.2 Abschätzung des Haftvermögens der Gesteinskörner in der Zementmatrix

Um die Haftung zu verbessern, wurde die Gesteinskörnung feucht, d. h. wassergesättigt, auf die Oberfläche aufgebracht. Dazu ist die erforderliche Gesteinsmenge trocken abgewogen, mit Leitungswasser 24 h bedeckt und vor Verdunstung geschützt im Labor bei 20 ± 2 °C gesättigt worden. Die vorgegebene Abstreumenge von 4 kg/m^2 ergibt für die gewählte Laborplattenfläche eine Abstreumenge von 280 g. Durch Abschütten des überschüssigen Was-

serters nach 24 h über einem Sieb ergibt sich für diese Abstreumenge eine Wasseraufnahme von rd. 1,2 %.

Nachdem die Probekörper mit wassergesättigten Gesteinskörnungen hergestellt wurden (Kapitel 5), galt es zu klären, inwieweit die einzelnen Körner in der Zementmatrix unter polierender Beanspruchung haften bleiben. Um das Verhalten der Oberfläche dahingehend einschätzen zu können, wurden mit Hilfe der kreisförmigen Poliereinrichtung der WEHNER/SCHULZE-Anlage die Oberflächen mit bis zu 360.000 Überrollungen beansprucht.

Visuell konnten keine Kornausbrüche im kompletten Untersuchungszeitraum festgestellt werden (Bild 17).

Darüber hinaus wurde der Abrieb bzw. die Abwitterung der Gesteinskörner infolge des Laborbeanspruchungszyklus (Kapitel 6.3) erfasst. In Bild 18 (ohne Faseranteil) und Bild 19 (mit Faseranteil) sind die Ergebnisse der Bestimmung des Abriebs infolge der Prallabriebbeanspruchung sowie der Abwitterung infolge des Frost-Tausalz-Angriffs als Summenlinie über dem Beanspruchungsverlauf an drei Probekörpern dargestellt. Die beanspruchte Fläche beim Prallabrieb besaß dabei einen Durchmesser von 105,0 mm und die beim Frost-Tausalz-Angriff die Durchmesser der jeweiligen Probekörper.

Der Gesamtkornverlust der geprüften Oberfläche beträgt im Mittel rd. 1,5 %, unabhängig davon, ob der Mörtel mit oder ohne Faserzugabe hergestellt worden ist. Etwa zu gleichen Teilen findet der Kornverlust während der Prallabriebbeanspruchung vor den Frost-Tau-Wechseln und während der Frost-Tau-Wechsel statt. Im Anschluss an die letztgenannten Beanspruchung werden durch den weiteren Prallabrieb vergleichsweise geringfügige Men-

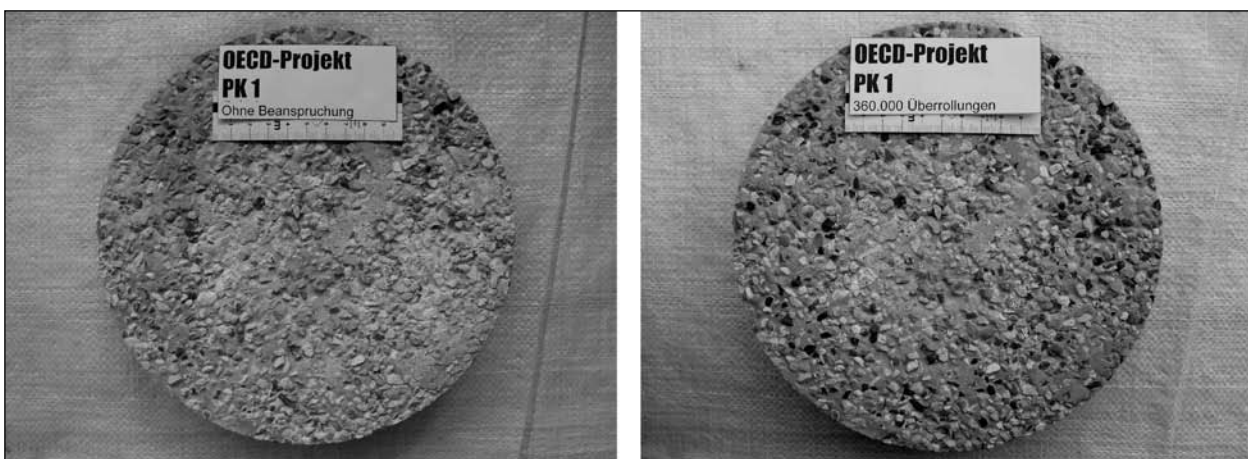


Bild 17: HPCM-Probekörper zu Beginn (links) und nach der Polierbeanspruchung (rechts) durch die Wehner/Schulze-Anlage

gen an Gesteinskörnern entfernt. Der Kornverlust steigt jedoch tendenziell weiter an. Die augenscheinliche Beurteilung der Oberflächen lässt den Schluss zu, dass die zu Beginn der Beanspruchung der Oberfläche nicht ausreichend in den Mörtel eingebundenen Körner durch Prallabrieb und Frost-Tau-Wechsel herausgelöst werden, wobei der Kornverlust an der Oberfläche durch den Frost-Tau-Wechsel höher ist.

Im Rahmen des OECD-Projektes wurde der Frost-Tausalz-Widerstand der abgestreuten Oberfläche separat untersucht (Tabelle 1, Nr. 8). Die für diese Untersuchungen verwendeten Probekörper wurden im Vorfeld für orientierende Prüfungen zur Spurrinnenbildung (Tabelle 1, Nr. 4) verwendet. Während des Spurrinentests traten Kornverluste auf, die jedoch nicht erfasst worden waren. Die anschließende o. g. Frostbeanspruchung führte zu keinen weiteren Kornverlusten.

Ob bei einem weiteren an den zweiten Prallabrieb anschließenden Frostzyklus ein erneuter Kornverlust auftreten würde, kann aufgrund dieser beiden gegensätzlichen Ergebnisse nicht beantwortet wer-

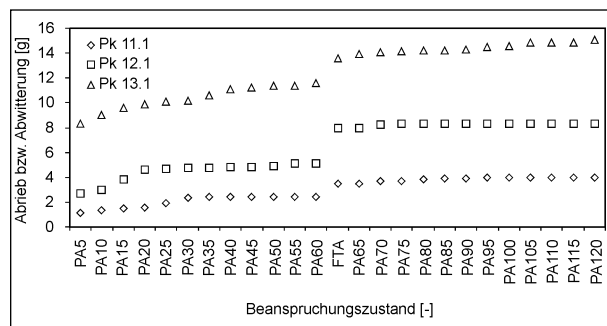


Bild 18: Darstellung des Abriebs bzw. der Abwitterung der abgestreuten Mörteloberflächen ohne Faseranteil infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus von drei Probekörpern in Form einer Summenlinie

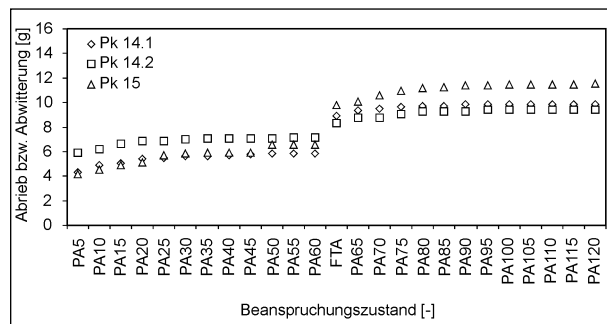


Bild 19: Darstellung des Abriebs bzw. der Abwitterung der Probekörper der abgestreuten Mörteloberflächen mit Faseranteil infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus von drei Probekörpern in Form einer Summenlinie

den. Das Verhalten der HPCM-Oberfläche sollte dahingehend weiter untersucht werden.

6.3 Untersuchungen mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Für diese Untersuchungen wurde ein kombinierter Laborbeanspruchungszyklus verwendet, der von der Technischen Universität München entwickelt wurde [6]. Dieser simuliert die Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt realitätsnah und zeittraffend und beinhaltet eine Abfolge aus, mechanischem, Frost-Tausalz und lösendem Angriff (Bild 20).

Für die Simulation der mechanischen Beanspruchung des Verkehrs im Zusammenhang mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus prallen in der Prallkammer Gummikugeln aus Polyurethan (Shore-Härte A = 80° ±5°; d = 30 mm) durch eine Schüttelbewegung auf die Oberfläche (Prallhöhe: rd. 3 · d = 90 mm, Schüttelfrequenz: 750 min⁻¹). Die Versuchsdauer beträgt pro Einzelbeanspruchung 5 Minuten.

Der Frost-Tausalz-Angriff (FTS) kann unter Laborbedingungen sehr realitätsnah und mit hoher Reproduzierbarkeit mit dem sog. CDF-Test (CDF: Capillary Suction of Deicing Chemicals and Freeze-Thaw) simuliert werden, welcher in der DIN EN 12390-9 [14] beschrieben ist. Auf ein kapillares Saugen vor der Prüfung und die damit verbundene höhere Porensättigung wird verzichtet, um die Beanspruchung zu verringern.

Die Simulation des lösenden Angriffs im Labor erfolgt während des Laborbeanspruchungszyklus mit

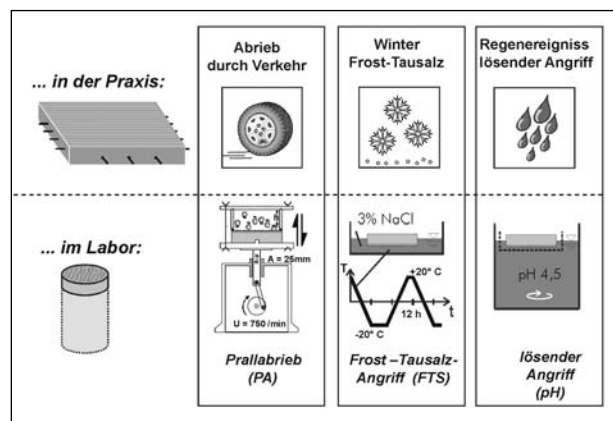


Bild 20: Schematische Darstellung der Einzelbeanspruchungen in der Praxis (oben); schematische Darstellung der Einzelbeanspruchungen zur Simulation der Praxisbeanspruchungen im Labor [6] (unten)

einem „konstanten“ lösenden Angriff bei einem pH-Wert von 4,5 auf die (eingetauchte) Betonoberfläche für die Dauer von 1 Stunde bei 20 °C. Das Prüfmedium, eine gepufferte Essigsäure, wird hierbei ständig umgewälzt. Der Versuchsablauf wurde von [15] entwickelt.

6.3.1 Ablauf des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die Dauer der Einzelbeanspruchungen wurde unter Berücksichtigung von aus der Praxis bekannten Texturveränderungen festgelegt. Dabei erfolgen im Standardzyklus der lösende Angriff für eine Stunde, der folgende Prallabrieb (PA) für 12 x 5 min, 6 Zyklen des Frost-Tausalzangriffs (FTS) sowie weitere 12 x 5 min Prallabrieb (PA II). Somit ist jeder mechanischen Beanspruchung eine Umweltbeanspruchung vorgeschaltet (Bild 21).

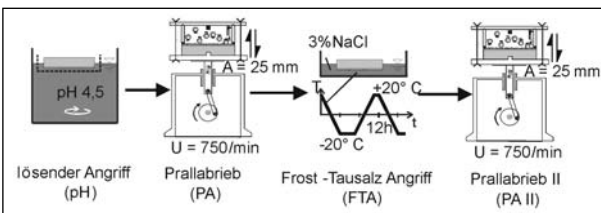


Bild 21: Abfolge der Einzelbeanspruchungen des Laborbeanspruchungszyklus [6]

Die einzelnen Messzeitpunkte zur Bestimmung der primären (Textur) und sekundären Oberflächeneigenschaften (Griffigkeit) werden jeweils vor bzw. nach der jeweiligen Beanspruchung durchgeführt. Hieraus ergibt sich ein „zeitlicher“ Verlauf der Änderungen der Oberflächenparameter.

6.3.2 Durchgeführte Messungen

- Griffigkeitseigenschaften mit dem SRT-Pendel

Die Messung der Griffigkeitseigenschaften der Probekörperoberflächen erfolgte mit dem SRT-Pendel (SRT: Skid Resistance Tester). Die Messungen wurden nach den TP Griff-StB, Teil: SRT, durchgeführt [16].

- Rautiefenbestimmung

Die Rautiefe der Probekörperoberflächen wurde entsprechend der DIN EN 13036-1 [17] bestimmt.

- Messung mit dem Doppeltriangulationssensor

Beschreibung des Messgerätes

Das Messgerät besteht im Wesentlichen aus einem Lasermesskopf, der an einer Aufhängung starr befestigt ist, sowie einem darunterliegenden Verfahrtsch, auf den der Probekörper mit der zu vermessenden Oberfläche gelegt wird. Der Lasermesskopf (Bild 22) arbeitet nach dem Doppeltriangulationssensor

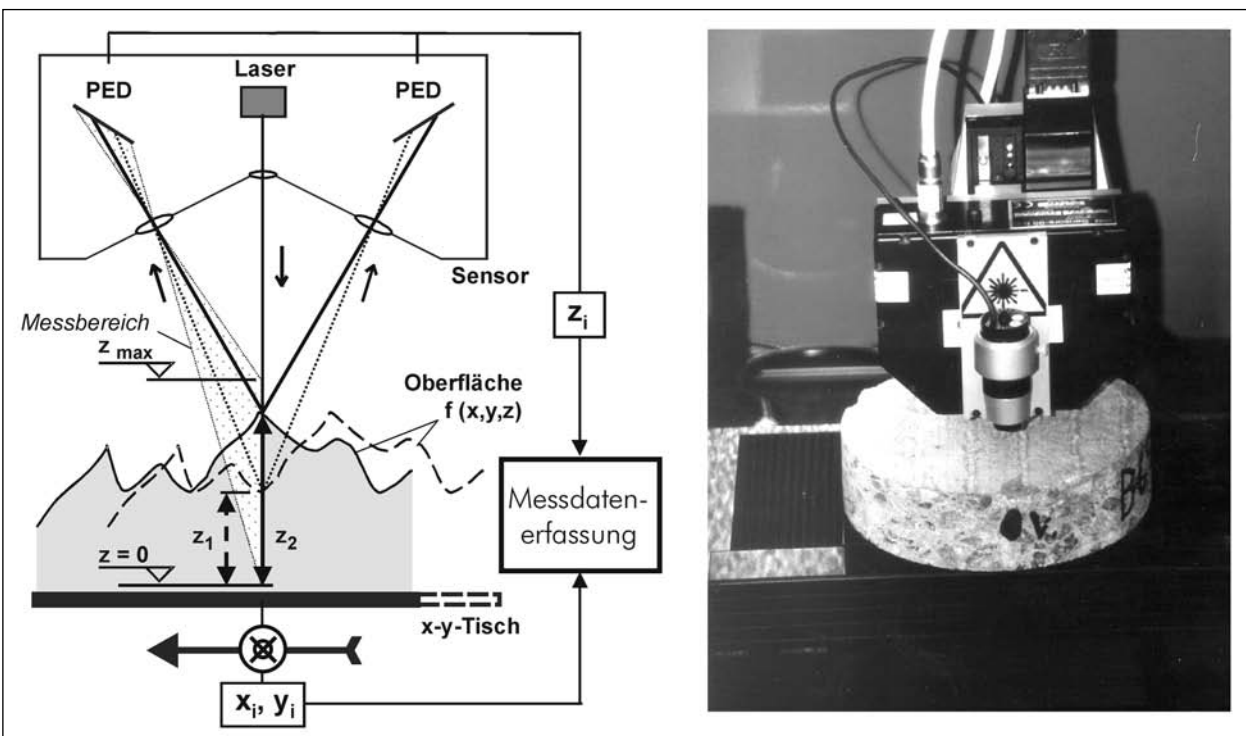


Bild 22: Schema der Funktionsweise des Doppeltriangulationssensors [6] (links), Foto des Doppeltriangulationssensors der TU München mit Bohrkernscheibe (h/d = 4/15 cm) [6] (rechts)

gulationsprinzip mit zwei symmetrisch angeordneten positionsempfindlichen Detektoren, die auf einen Messbereich von max. $\Delta z = 3 \text{ mm}$ kalibriert sind, womit eine maximale Texturtiefe von 3 mm erfassbar ist. Die laterale Auflösung beträgt $30 \text{ }\mu\text{m}$ und die vertikale $0,3 \text{ }\mu\text{m}$. Der x-y-Tisch, auf dem die Probe fixiert wird, kann in der horizontalen Ebene maximal $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (mit Hilfe eines Schrittmotors) abfahren.

Bei jeder Inbetriebnahme des Gerätes fährt der x-y-Tisch zur Kalibrierung in eine äußere Ecke seines maximalen Messbereichs und setzt diese Position zu seinem Koordinatenursprung, sodass mit ortstreuen Koordinaten gearbeitet werden kann.

Auswertung der Messdaten

Bei der Auswertung der Messdaten wurden die jeweiligen Wellenlängenbereiche der Mikro- und Makrotextur (bis $\lambda = 10 \text{ mm}$), wegen ihrer unterschiedlichen Bedeutung für das Gebrauchsverhalten der Fahrbahnoberfläche, getrennt untersucht [6]. Für die Analyse wurden grundsätzlich zwei Verfahren verwendet – die Analyse des Wellenlängen-Amplituden-Spektrums sowie die der Materialanteilkurve. Für die Analyse der Makrotextur ($0,5 < \lambda < 10 \text{ mm}$) eignet sich die im Folgenden beschriebene Analyse der Materialanteilkurve.

In Bild 23 sind links ein Profilschnitt und rechts die dazugehörige Materialanteilkurve dargestellt.

Bei der Materialanteilkurve wird der Flächenanteil einer Profillinie über Schnittebenen, die in konstanten Abständen über die Höhe z gelegt werden, als Summenlinie dargestellt, wobei von oben nach unten aufsummiert wird. Der Verlauf dieser Materialanteilkurve ist charakteristisch für jedes Profil. Sie ist zudem für mechanisch hoch beanspruchte Flächen von Bedeutung, da Informationen sowohl über die Rautiefe als auch über die Profildorm ent-

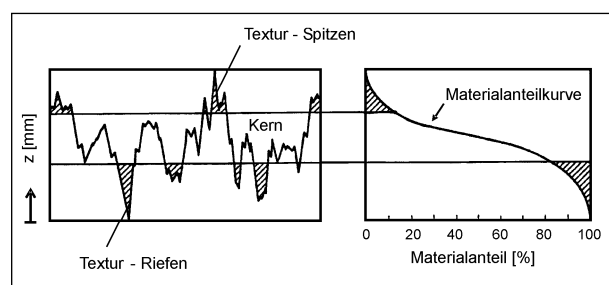


Bild 23: Links: Profilschnitt mit den jeweiligen Profilbereichen, rechts: Materialanteilkurve [18]

halten sind, d. h., Texturprofile etwa gleicher Rautiefe, aber mit unterschiedlichem Profilverlauf können unterschieden werden [18, 19].

Die Materialanteilkurve weist als einen signifikanten Punkt einen Krümmungswechsel auf, der das Profil in einen Bereich mit überwiegend Spitzen (links davon) und einen Bereich mit überwiegend Riefen (rechts davon) einteilt.

Für die Betrachtung der Mikrotextur (bis $\lambda = 0,5 \text{ mm}$) eignet sich die Analyse des jeweiligen Wellenlängen-Amplituden-Spektrums. Die Mikrotextur und deren Veränderungen infolge der verschiedenen Beanspruchungen werden mittels des aus dem Wellenlängen-Amplituden-Spektrum abgeleiteten Mikrokennamplitudenwerts „ $A_{\mu 0,5}$ “ beschrieben. Das Wellenlängen-Amplituden-Spektrum wird mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) ermittelt, wobei die Amplitudenwerte im linearen Maßstab über die zugehörigen Wellenlängen aufgetragen werden (Bild 24). Für die Analyse der Mikrotextur werden die langwelligigen Anteile ($\lambda > 0,5 \text{ mm}$) entfernt und die Regressionsgerade des Wellenlängen-Amplituden-Spektrums der Mikrotextur bestimmt. Die Regressionsgerade mit der Steigung p ermöglicht die Bestimmung einer Amplitudenhöhe, die zu der Bezugswellenlänge $\lambda = 0,5 \text{ mm}$ zugehörig ist, und ergibt die Kennamplitude der Mikrotextur „ $A_{\mu 0,5}$ “ [6].

Eine Abnahme des Mikrokennamplitudenwerts $A_{\mu 0,5}$ weist auf einen Höhenverlust der Amplituden im Bereich der Mikrotextur bzw. eine Zunahme der Werte auf ein Aufrauen der Oberfläche hin.

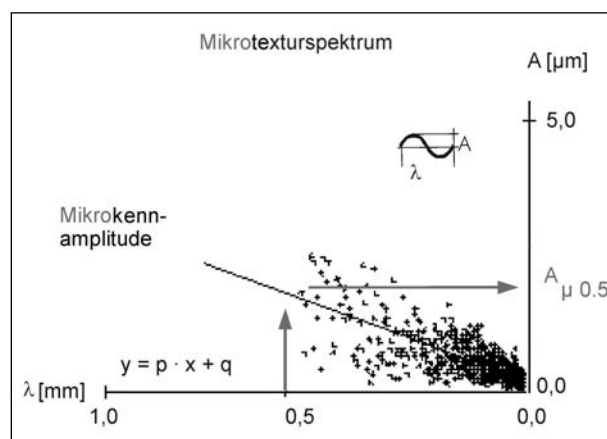


Bild 24: Darstellung der Bestimmung des Mikrokennamplitudenwertes $A_{\mu 0,5}$ [6]

6.3.3 Entwicklung der Oberflächeneigenschaften nach dem Laborbeanspruchungszyklus

Aus den hergestellten Probeplatten wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm herausgeschnitten und mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus beansprucht. Die abgestreuten Mörteloberflächen ohne Faserzugabe sind mit den Bezeichnungen „11.1“, „12.1“, und „13.1“ versehen, die mit Faserzugabe mit „14.1“, „14.2“ und „15“.

- Griffigkeitseigenschaften

In den Bildern 25 und 26 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Oberflächenschärfe, abgeschätzt mit dem SRT-Pendelgerät, was einen Rückschluss auf die Mikrotextur erlaubt, während des Beanspruchungsverlaufs dargestellt.

Die Ergebnisse der Messungen mit dem SRT-Pendelgerät liegen zwischen 70 und 80 SRT-Einheiten und ändern sich im Verlauf des Laborbeanspruchungszyklus unwesentlich. Da beide Mörtel mit

dem gleichen Material abgestreut worden sind, unterscheiden sich die Ergebnisse hinsichtlich des Faseranteils nicht. Die Probekörperoberfläche weist demnach eine ähnliche Gestalt und sehr gute Schärfe auf. Da der verwendete Bauxit einen sehr hohen Widerstand gegen Polieren besitzt, ist auch bei weiteren Beanspruchungszyklen zunächst keine Veränderung der Oberflächenschärfe zu erwarten.

- Rautiefe

In den Bildern 27 und 28 sind die Ergebnisse der Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe (Rautiefe) nach DIN EN 13036-1 [17] während des Beanspruchungsverlaufs dargestellt. Der jeweilige Messwert jedes Probekörpers ist ein Mittelwert aus drei Wiederholungsmessungen.

Die mittlere Oberflächentexturtiefe beträgt auf den Probekörpern, die ohne Fasern gefertigt wurden, zwischen rd. 1,5 mm und 1,8 mm. Auf den Probekörpern mit Faseranteil im Mörtel liegt die Rau-

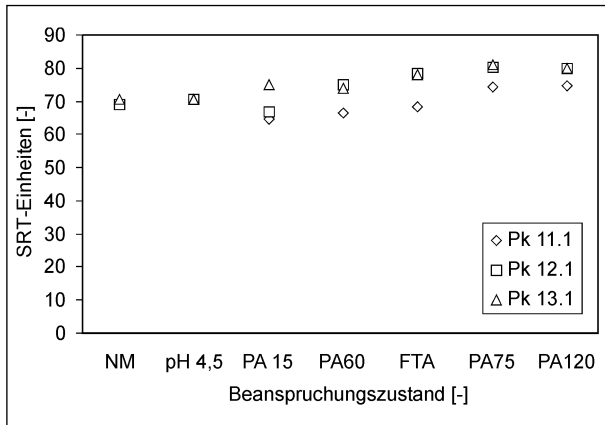


Bild 25: Entwicklung der SRT-Werte während des Beanspruchungszyklus der Probekörper der Mörteloberflächen ohne Faseranteil

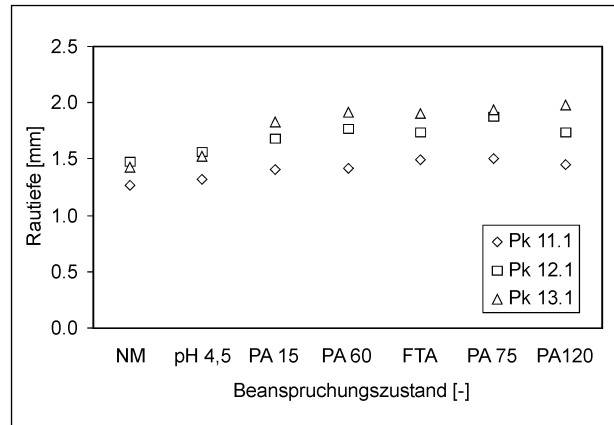


Bild 27: Entwicklung der Rautiefe während des Beanspruchungszyklus der Probekörper der Mörteloberflächen ohne Faseranteil

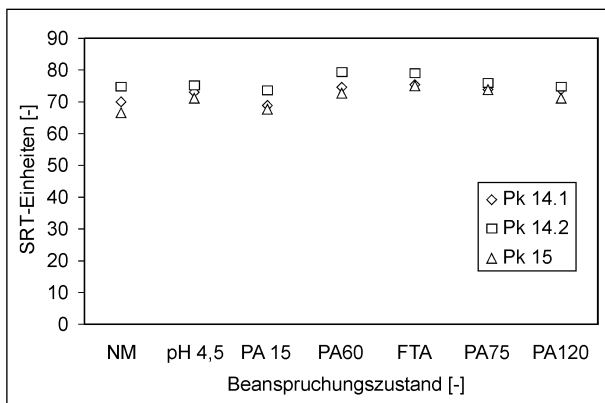


Bild 26: Entwicklung der SRT-Werte während des Beanspruchungszyklus der Probekörper der Mörteloberflächen mit Faseranteil

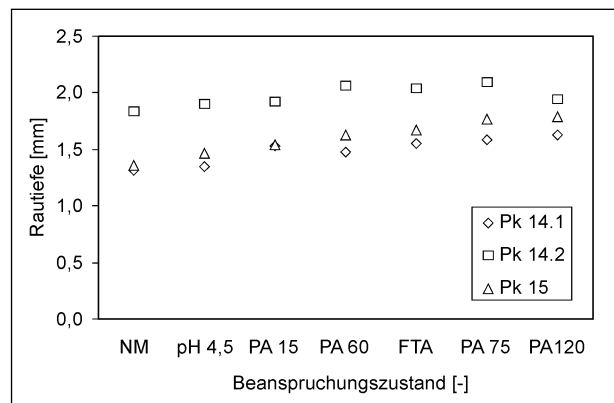


Bild 28: Entwicklung der Rautiefe während des Beanspruchungszyklus der Probekörper der Mörteloberflächen mit Faseranteil

tiefe im Mittel zwischen rd. 1,5 mm und 2,0 mm. Insgesamt ist die Rautiefe beider Oberfläche als sehr gut zu bewerten, wobei die Oberflächen mit Faseranteil im Mörtel einen geringfügig höheren Wert aufweisen. Dieses ist auf die Fasern zurückzuführen, die das Einbringen der Gesteinskörner in den frischen Mörtel erschweren (Kapitel 5.4). Auf allen untersuchten Probekörpern steigt die Rautiefe tendenziell mit zunehmender Beanspruchung an,

was augenscheinlich auf ein Entfernen von Mörtel zwischen den eingebundenen Gesteinskörnern zurückzuführen ist.

- Messung mit dem Doppeltriangulationssensor

Makrotextur

In den Bildern 29 bis 31 ist die Veränderung der Texturgeometrie im Bereich der Makrotextur durch

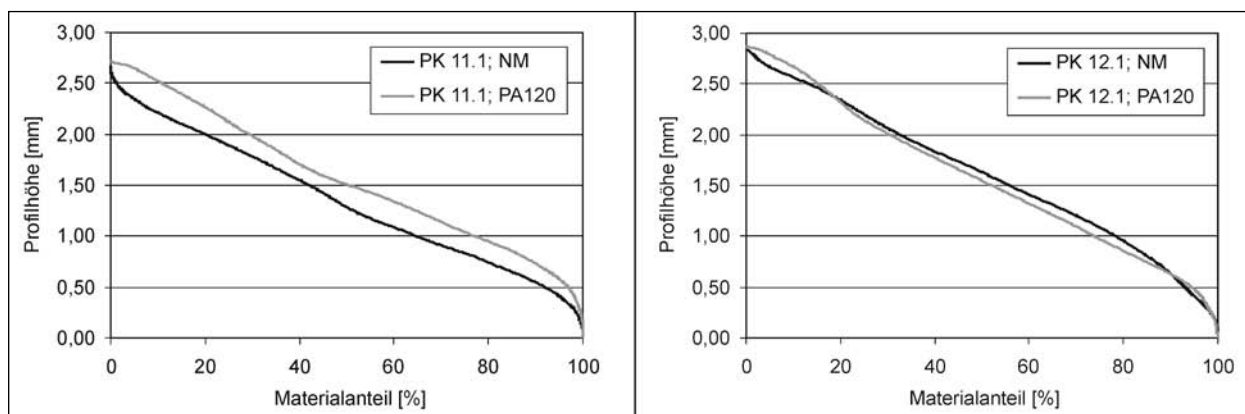


Bild 29: Materialanteilkurve der untersuchten Oberflächen der Probekörper der Mörteloberflächen ohne Faseranteil im Ausgangszustand (Nullmessung) sowie am Zyklusende (PA 120)

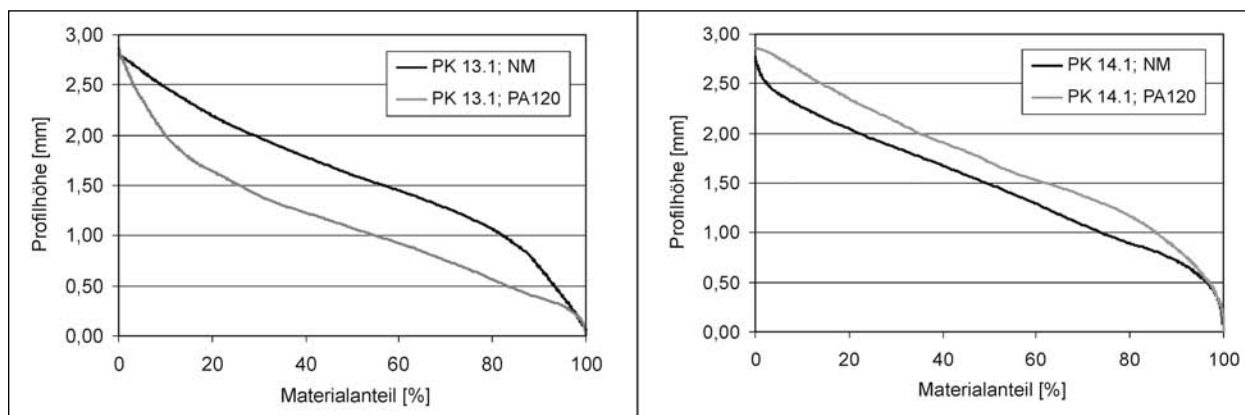


Bild 30: Materialanteilkurve der untersuchten Oberflächen der Probekörper der Mörteloberflächen ohne (links) bzw. mit (rechts) Faseranteil im Ausgangszustand (Nullmessung) sowie am Zyklusende (PA 120)

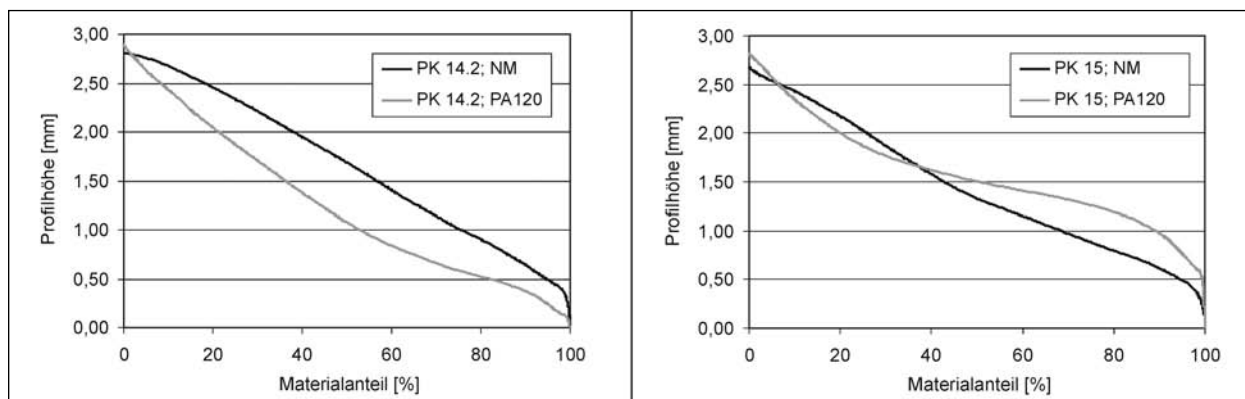


Bild 31: Materialanteilkurve der untersuchten Oberflächen der Probekörper der Mörteloberflächen mit Faseranteil im Ausgangszustand (Nullmessung) sowie am Zyklusende (PA 120)

die Materialanteilkurve im unbelasteten Zustand (Nullmessung, NM) und zum Zyklusende (PA 120) dargestellt.

Üblicherweise weist die Materialanteilkurve einen signifikanten Krümmungswechsel auf, sodass das Profil in einen Spitzen- und Riefenbereich unterteilt werden kann. Dieser Krümmungswechsel ist hier nur bei einem Probekörper sichtbar. Alle anderen Oberflächen zeigen vor und nach der Beanspruchung mit dem Laborzyklus einen annähernd linearen Verlauf. Insgesamt betrachtet unterliegen die Materialanteilkurven aller untersuchten Oberflächen starken Streuungen. Sowohl innerhalb der Probekörperserie ohne als auch mit Faseranteil ist anhand der Materialanteilkurven tendenziell nicht erkennbar, inwieweit sich die Oberfläche durch die Beanspruchung mit dem Laborzyklus verändert. Allen gemein ist jedoch ein hoher Materialanteil im Spitzenbereich. Nach [4] sollte eine geräuschreduzierende Oberfläche jedoch eher als Plateau mit Schluchten ausgeprägt sein, was sich in der Materialanteilkurve durch einen hohen Riefen- und geringen Spitzenanteil ausdrückt. Der Probekörper in Bild 31 rechts (PK 15) nach der Laborbeanspruchung kommt dieser Art von Profil am nächsten. Augenscheinlich lassen sich zwischen allen Oberflächen keine Unterschiede feststellen.

- Mikrotextur

In den Bildern 32 und 33 sind die Mikrokennamplitudenwerte $A_{\mu 0,5}$ (Kapitel 7.3.1) der bisher untersuchten Probekörperoberflächen im unbelasteten Zustand (Nullmessung) und am Zyklusende (PA 120) dargestellt. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils die Einzelwerte der Probekörperoberflächen.

Die Mikrokennamplituden liegen zwischen 6 und 8 μm . Diese ändern sich unter dem Einfluss der Laborbeanspruchung überwiegend nicht, was auf eine beständige Mikrotextur hinweist. Die Mikrotextur wird hier ausschließlich von der groben Gesteinskörnung beeinflusst. Wie die Untersuchungen zum Polierwiderstand zeigen, handelt es sich hier um ein sehr widerstandsfähiges Gestein. Die Ergebnisse der Messungen mit dem SRT-Pendelgerät und des Polierwiderstandes der Gesteinskörnung werden durch die Mikrokennamplitude bestätigt.

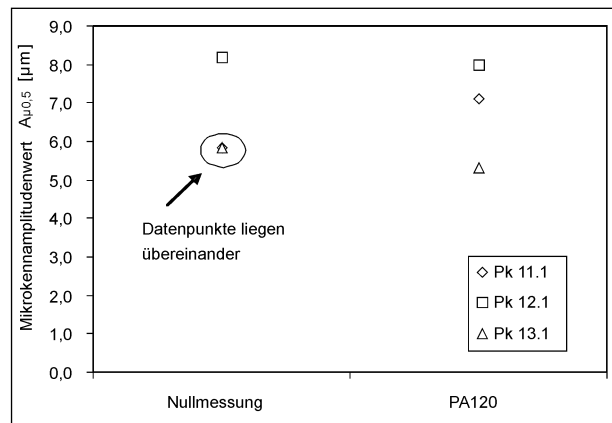


Bild 32: Mikrokennamplitudenwerte $A_{\mu 0,5}$ der Oberflächen der Probekörper der Mörteloberflächen ohne Faseranteil im Ausgangszustand (Nullmessung) und am Zyklusende (PA 120)

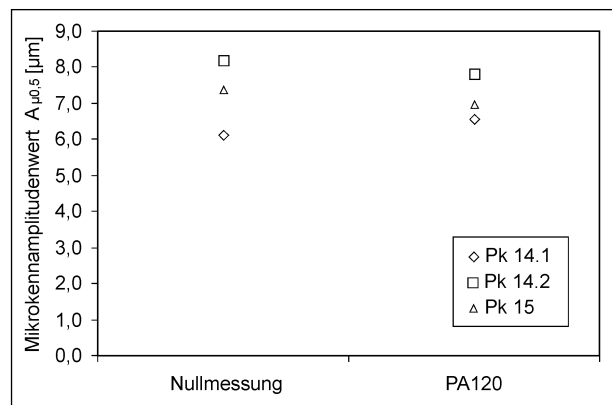


Bild 33: Mikrokennamplitudenwerte $A_{\mu 0,5}$ der Oberflächen der Probekörper der Mörteloberflächen mit Faseranteil im Ausgangszustand (Nullmessung) und am Zyklusende (PA 120)

6.3.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Mikrotextur der Oberfläche, abgeschätzt mit dem SRT-Pendelgerät und durch die Mikrokennamplitude, verändert sich durch die Beanspruchung mit dem Laborzyklus nicht. Die Probekörperoberflächen weisen, bedingt durch das verwendete Gestein, eine sehr hohe Schärfe auf.

Die Makrotextur, bestimmt mit dem Sandfleckverfahren, steigt tendenziell mit zunehmender Beanspruchung an. Dieses ist augenscheinlich auf das Entfernen des Mörtels zwischen den groben Gesteinskörnern zurückzuführen. Im Hinblick auf die Griffigkeitseigenschaften dieser Oberfläche ist die Rautiefe als sehr gut zu bewerten. Wird jedoch die Gestalt der Oberfläche, die die akustischen Eigenschaften beeinflusst, mitbetrachtet, so weist die Oberfläche eine ungünstige Gestalt auf. Diese resultiert aus dem hohen Spitzen- und geringen Riefengehalt in der Materialanteilkurve.

6.4 Berechnung der Geräusch-emission

Für die Abschätzung der Geräuschemissionen rollender Pkw auf einer dichten Fahrbahnoberfläche ist im Rahmen eines Forschungsprojektes das Berechnungsmodell „SPERoN“ (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) entwickelt worden [4, 5], das eine Kombination aus einem physikalischen und statistischen Ansatz darstellt. Mit Hilfe mathematischer Algorithmen wird das Schwingverhalten des rollenden Reifens unter Berücksichtigung der resultierenden Kräfte in der Kontaktfläche sowie der Reifen- und Fahrbahneigenschaften simuliert. Das Modell liefert einen quantitativen Zusammenhang zwischen mathematisch berechneten Größen und dem daraus resultierenden Schalldruckpegel. Die Validierung und Kalibrierung des Modells erfolgten mit einer Vielzahl von Messwerten für unterschiedliche Reifen/Fahrbahn-Kombinationen, für die auch Messwerte des Vorbeirollpegels vorlagen.

Das Modell benötigt als Eingangsdaten Texturdaten, die die Länge eines einmaligen Abrollvorgangs und die Breite eines Pkw-Reifens abbilden. Das Messfeld sollte somit mindestens 2 m lang und 40 cm breit sein. Im Rahmen der Untersuchungen zur In-Situ-Rissentwicklung (Tabelle 1, Nr. 6) sind auf dem Freigelände des LCPC 6 m lange Streifen aus abgestreutem HPCM hergestellt worden. Diese Streifen wurden mit dem Texturmessgerät der BAST erfasst und als Datengrundlage herangezogen. Bild 34 zeigt die Ergebnisse der Berechnung des Schalldruckpegels mit dem SperOn-Modell auf der HPCM-Oberfläche im Vergleich zu Waschbetonoberflächen mit verschiedenen Texturtiefen (0,4 mm und 0,8 mm). Die Texturtiefe der HPCM-Oberfläche beträgt rd. 1,5 mm.

Die abgestreute Oberfläche weist im Vergleich zu den Waschbetonoberflächen einen um rd. 5 dB (A) erhöhten Schalldruckpegel auf. Der Geräuschpegel ist sowohl auf die höhere Texturtiefe als auch auf den ausgeprägten Spitzenbereich (Bilder 29 bis 31) zurückzuführen [4]. Darüber hinaus hat auch die Herstellung der 6-m-Streifen die Geräuschentwicklung negativ beeinflusst. Zum einen wurden die Oberflächen mit trockener Gesteinskörnung abgestreut, was bis zum Zeitpunkt der Texturmessungen augenscheinlich zu einem Kornverlust an der Oberfläche infolge Witterung geführt hat. Zum anderen sind weitere Kornverluste an den Rissorten entstanden. Diese Fehlstellen führen zu einer ungleichmäßigen Oberfläche, die den Reifen zu me-

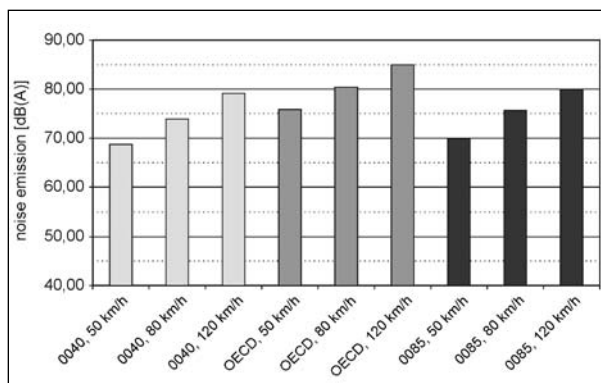


Bild 34: Berechnete Geräuschemissionen mit dem SperOn-Modell

chanischen Schwingungen anregt. Insgesamt werden die aus den Materialanteilkurven analysierten Tendenzen bestätigt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Phase II des OECD-Projektes „Beurteilung der Wirtschaftlichkeit langlebiger Straßenbeläge“ wird die Eignung von Epoxid-Asphalten und zementgebundenen Hochleistungsmaterialien (HPCM) hinsichtlich ihrer Verwendung als langlebige Straßendeckschicht im Labor beurteilt. Teil dieses Berichtes sind die Untersuchungen der Oberflächeneigenschaften, die von der BAST selbst durchgeführt bzw. in Auftrag gegeben wurden. Für die Untersuchungen war es erforderlich, eigene HPCM-Probekörper herzustellen. Nach umfangreichen Vorversuchen mit dem angelieferten HPCM-Trockenmörtel sowohl mit als auch ohne Faserzugabe konnten Probepplatten mit der vorgegebenen Mörtelschichtdicke von 8 mm zielsicher hergestellt werden. Das von der OECD-Projektgruppe empfohlene Mischungsverhältnis von Trockenmörtel zu Wasser sowie das Mischregime wurden verwendet. Die Anforderungen an die Druck- und Biegezugfestigkeit des Mörtels wurden erfüllt. Jedoch hatte der hier verwendete Mörtel eine etwas weichere Konsistenz.

Die empfohlene Abstreutechnik der groben Gesteinskörnung wurde aufgrund des hohen Kornverlustes dahingehend modifiziert, dass die Gesteinskörner manuell aufgestreut und anschließend mit einer nicht klebenden Platte angedrückt worden sind. Nach der Feststellung, dass die abgestreute trockene Gesteinskörnung dem umliegenden Mörtel das Wasser zur Hydratation entzieht, wurde das

Abstreuen mit 24-h-wassergesättigter Gesteinskörnung vorgenommen. Dadurch konnte der Kornverlust an der Oberfläche deutlich reduziert werden. Das resultierende Haftungsvermögen der Gesteinskörner in der Matrix, abgeschätzt mit der Poliereinrichtung der Wehner/Schulze-Anlage, war sehr hoch.

Hingegen zeigte sich bei der kombinierten Prüfung aus Abrieb und Abwitterung, dass ein Kornverlust von rd. 1,5 % je Beanspruchungszyklus an der Oberfläche eintritt. Der Kornverlust durch Abwitterung konnte in Untersuchungen anderer Laboratorien nicht bestätigt werden. Die dort verwendeten Probekörper wurden jedoch vorab einem Spurbildungstest unterzogen, bei dem der Abrieb nicht erfasst worden war. Aufgrund der beiden gegensätzlichen Ergebnisse und eines tendenziellen Anstiegs des Kornverlustes bei weiterer Beanspruchung nach den Frost-Tau-Wechseln sollte das Verhalten der HPCM-Oberfläche weiter untersucht werden.

Die Oberflächeneigenschaften und deren Verhalten unter den Einflüssen von Witterung und Verkehr wurden im Labor mit Hilfe des kombinierten Labor-Beanspruchungszyklus simuliert. Die Mikrotextur der Oberfläche, abgeschätzt mit dem SRT-Pendelgerät und durch die Mikrokennamplitude, verändert sich durch die Beanspruchung mit dem Laborzyklus nicht. Die Probekörperoberflächen weisen, bedingt durch das verwendete Gestein, eine sehr hohe Schärfe auf.

Die Makrotextur, bestimmt mit dem Sandfleckverfahren, steigt tendenziell mit zunehmender Beanspruchung an. Dieses ist augenscheinlich auf das Entfernen des Mörtels zwischen den groben Gesteinskörnern zurückzuführen. Im Hinblick auf die Griffigkeitseigenschaften dieser Oberfläche ist die Rautiefe als sehr gut zu bewerten.

Die abgestreute HPCM-Oberfläche (Texturtiefe ca. 1,5 mm) weist im Vergleich zu den Waschbetonoberflächen (Texturtiefen von 0,4 mm bis 0,8 mm) einen um rd. 5 dB (A) erhöhten Schalldruckpegel auf. Der Geräuschpegel ist sowohl auf die höhere Texturtiefe als auch auf den ausgeprägten Spitzenbereich, der aus der Materialanteilkurve ersichtlich ist, zurückzuführen. Darüber hinaus hat die Herstellung der Probestreifen die Geräuschentwicklung negativ beeinflusst. Zum einen wurden die Oberflächen mit trockener Gesteinskörnung abgestreut, was bis zum Zeitpunkt der Texturmessungen augenscheinlich zu einem Kornverlust an der Oberfläche infolge Witterung geführt hat. Zum anderen

sind weitere Kornverluste an den Rissorten entstanden, was zu weiteren Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche führte. Diese Fehlstellen regen den Reifen zu mechanischen Schwingungen an und führen letztendlich zu einer Erhöhung des Rollgeräusches.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Mikro- und Makrotextur hinsichtlich des zu erwartenden Griffigkeitsverhaltens der Oberfläche sehr gute Eigenschaften aufweisen. Wird jedoch die Gestalt der Oberfläche, die die akustischen Eigenschaften beeinflusst, mitbetrachtet, so weist die Oberfläche eine ungünstige Gestalt auf. Diese resultiert aus dem hohen Spitzen- und geringen Riefengehalt in der Materialanteilkurve.

Die Eigenschaften der HPCM-Oberfläche sollten unter Berücksichtigung der Hinweise für geräuschreduzierende Oberflächengestaltungen, wie z. B. Reduzierung des Größtkorns oder Ausbildung der Oberfläche als Plateau mit Schluchten, weiter optimiert werden. Darüber hinaus ist das Verhalten der Oberfläche hinsichtlich des Kornverlustes und damit nicht weiter vorhandenen Griffigkeitspotenzials weiter zu untersuchen. Dies könnte mit Hilfe von Rundlaufprüfanlagen im Labor- oder auch größeren Maßstab erfolgen.

Im Rahmen des Projektes werden großformatige Probeflächen mittels Rundlaufprüfanlagen in Frankreich und England untersucht. Die Ergebnisse könnten weiteres Optimierungspotenzial aufzeigen. Der Abschluss des OECD-Projektes, Phase I, ist für Sommer 2007 geplant.

Literatur

- [1] OECD report: Economic Evaluation on Long-Life Pavements, Phase 1, OECD publishing, ISBN-92-64-00856-X, 2005
- [2] DIN EN 1097-8: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 8: Bestimmung des Polierwertes, Ausgabe Januar 2000
- [3] Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau (TP Min-StB), Teil 5.5.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach WEHNER/SCHULZE, Ausgabe 1999
- [4] BECKENBAUER, T., SPIEGLER, P., van BLOKLAND, G., KUIJPERS, A., REINIK, F., HUSCHEK, S., STÜTZE, T., HEERKENS, J.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 847, BMVBW, 2002
- [5] Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 37, 2004
- [6] SCHIEßL, P., BECKHAUS, K., WENZL, P.: Dauerhaftigkeit von Betondecken, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 902, BMVBS
- [7] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Ausgabe Mai 2005
- [8] DIN EN 1015-7: Prüfung für Mörtel für Mauerwerk, Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel, Ausgabe 1998
- [9] DIN 12350-2: Prüfung von Frischbeton, Teil 2: Setzmaß, Ausgabe 2000
- [10] HUSCHEK, S.: Die Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach WEHNER/SCHULZE, Bitumen, 64. Jahrgang, Heft 1, März 2002
- [11] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04), Abs. 2.2.14, Ausgabe 2004
- [12] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Ausgabe Dezember 2005
- [13] DIN EN 1367-1: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes, Ausgabe Januar 2000
- [14] DIN EN 12390-9: Prüfung von Festbeton, Teil 9: Prüfung von Frost und Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterung, Entwurf Mai 2002
- [15] DORNER, H., HILBIG, H.: Widerstand von Beton sehr geringer Porosität gegenüber einem sehr starken chemischen Angriff, Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben (Nr. Do. 279), 12/1999
- [16] Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: SRT (TP Griff-StB, Teil: SRT), Ausgabe 2004
- [17] DIN EN 13036-1: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens, Ausgabe August 2001
- [18] DIN EN ISO 13565-2: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften, Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve, April 1998
- [19] BODSCHWINNA, H.: Rauheitsmesstechnik und Kennwerte. 2. Fachtagung „Honen in Forschung und industrieller Anwendung“, Braunschweig 27./28.11.1991, S. 230-257

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

1993

- S 1: Verwitterungsbeständigkeit von Recycling-Baustoffen
Guth kostenlos
- S 2: Eignung von Grubenbergen als Baustoff für Tragschichten
ohne Bindemittel
Guth kostenlos
- S 3: Altlastenerfassung durch geophysikalische Methoden
Faust kostenlos
- S 4: EPS-Hartschaum als Baustoff für Straßen
Bull-Wasser kostenlos
- S 5: Baubegleitende Messungen B 73n
Heinisch, Blume kostenlos
- S 6: Eignung überdeckter Fugen mit Querkraftübertragung
Fleisch, Bartz kostenlos

1994

- S 7: 33. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00

1995

- S 8: Anleitung Qualitätsmanagementplan Asphalttragschichten
Freund, Stöckner € 12,50
- S 9: Meßwert- und rechnergestütztes Management der Stra-
ßenenerhaltung – Niederschrift und Referate des Erfahrungsaustau-
ches am 16. und 17. Mai 1995 in Berlin € 13,00
- S 10: 34. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00

1996

- S 11: Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und
Rollwiderstand
Ullrich, Glaeser, Sander € 15,00
- S 12: Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen –
Projektgruppe „Lärmindernde Straßendecken“ € 10,00
- S 13: Qualität von mineralischen Straßenbaustoffen
Tabbert € 16,50

1997

- S 14: 35. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 16,50
- S 15: Anforderungen an Fugenfüllsysteme aus Temperaturdeh-
nungen
Eisenmann, Lechner € 12,50
- S 16: Sicherheitswirksamkeit ausgewählter Straßenbaumaßnah-
men im Lande Brandenburg
Schnüll, Handke, Seitz € 22,00

1998

- S 17: Restnutzungsdauer von Asphalttschichten
Wolf € 13,00

- S 18: 2. Erfahrungsaustausch über rechnergestütztes Stra-
ßen-
erhaltungsmanagement € 14,50

- S 19: Einfluß der Bruchflächigkeit von Edelsplitten auf die Stand-
festigkeit von Asphalten
Teil 1: Literaturlauswertung
Beckedahl, Nösler, Straube
Teil 2: Einfluß des Rundkornanteils auf die Scherfestigkeit von
Gesteinskörnungen
H.G. Diel € 16,50

1999

- S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00
- S 21: Walzbeton: Ergebnisse aus neuester Forschung und lang-
jähriger Praxis – Kompendium
Birmann, Burger, Weingart, Westermann
Teil 1: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (1)
Schmidt, Bohlmann, Vogel, Westermann
Teil 2: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (2)
Weingart, Dreßler
Teil 3: Messungen an einer Versuchsstrecke mit Walzbeton-Trag-
schicht an der B54 bei Stein-Neukirch
Eisenmann, Birmann
Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichte-
verlauf und Ebenheit von Walzbeton
Burger € 17,00

2000

- S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen
Straßenenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenenerhaltung
€ 19,50
- S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,
v. d. Elshout, Sym € 10,50

2001

- S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-
grund - Konsolidationsverfahren -
Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim
Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund
Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf
wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolida-
tionsverfahren
Koch € 17,50
- S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 16,50

2002

- S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-
grund - Aufgeständerte Gründungspolster
Rogner, Stelter € 14,00
- S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von
Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung
der ZTV-M 02
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50
- S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundes-
fernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität
des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am
25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00
- S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines For-
schungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeits-
ausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saar-
brücken € 13,50

2003

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –
€ 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues „Straßenrecht“ am 23./24. September 2002 in Saarbrücken
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsvorhabens der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

2004

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

2005

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

2006

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2007

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus
Grupp, Blümel € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

2008

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“
Durner € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Sliwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.