

Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositäts- verändernde Zusätze

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 146

bast

Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositäts- verändernde Zusätze

von

Martin Radenberg
Michael Gehrke

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 146

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 Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst Forschung kompakt berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 84.0100
Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei max. 230 Grad Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Fachbetreuung
Franz Bommert

Referat
Asphaltbauweisen

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-549-1

Bergisch Gladbach, Dezember 2020

Kurzfassung – Abstract

Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei max. 230 Grad Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Zur Reduzierung der Dämpfe und Aerosole gilt seit 2008 der Einbau von Gussasphalt unter Verwendung viskositätsverändernder Zusätze bei maximal 230 °C als Regelbauweise. Das Ziel des Forschungsprojektes bestand daher darin, die Möglichkeit zur Verarbeitung von verformungsbeständigem Gussasphalt bei maximal 230 °C ohne viskositätsverändernde Zusätze und die Emissionen der hierbei entstehenden Dämpfe und Aerosole zu untersuchen.

Für eine aussagekräftige Ansprache der Gussasphalte im Labor wurde im Rahmen des Projektes ein Verfahren zur Herstellung von praxisgerechtem Gussasphalt mittels Labormischer entwickelt. Zudem wurde ein Bezugswert zur Quantifizierung des Verarbeitungsverhaltens ermittelt: durch einen Vergleich der Laboruntersuchungen mit den Praxiserfahrungen konnte nachgewiesen werden, dass bei Unterschreitung eines Rührwiderstandsmoments von 100 Ncm (Bestimmung des Verarbeitungswiderstandes nach M TA, 2011) eine gute Verarbeitbarkeit sichergestellt ist.

Eine systematische Optimierung der Komponenten Bitumen, Füller, feine und grobe Gesteinskörnung zeigt, dass hierzu wenige allgemeingültige Aussagen getroffen werden können. Neben einer kontinuierlichen Korngrößenverteilung ist lediglich der positive Einfluss schwach versteifender Kalksteinfüller auf die Verarbeitbarkeit, Verformungsbeständigkeit und Homogenität bei allen Gussasphalten festzustellen.

Aus den durchgeführten Praxiserprobungen geht hervor, dass der Einbau von verformungsbeständigen Gussasphalten ohne viskositätsverändernde Zusätze bei maximal 230 °C möglich ist. Die Expositionsmessungen der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) haben darüber hinaus gezeigt, dass die Konzentration an Dämpfen und Aerosolen auch ohne den Einsatz viskositätsverändernder Zusätze deutlich unterhalb des früheren Grenzwertes von 10 mg/m³ liegen. Die Expositionen hängen somit nicht maßgeblich von dem Gebrauch viskositätsverändernder Zusätze ab.

Research on the possibility of mastic asphalt processing at max. 230 degree centigrade without temperature reducing additives

For the reduction of fumes and aerosols, mastic asphalt paving at maximal 230 °C using temperature reducing additives is valid as standard construction, since 2008. Therefore the goal of this research project was to examine the possibility of a processing of deformation resistant mastic asphalt at maximal 230 °C without temperature reducing additives and the emission of occurring fumes and aerosols.

Within the framework of the project a process for the production of practice-oriented mastic asphalt employing the laboratory mixer was developed. Furthermore a reference value for the quantification of the processing behavior was determined. Due to a comparison of the laboratory tests with the practical experiences it could be proven, that a good workability is ensured by a lower deviation of a stirring section modulus of 100 Ncm (determination of the processing resistance according to M TA 2011).

A systematic optimization of the components bitumen, filler, fine and coarse aggregates shows, that only a few generally valid statements can be established. Besides a continuous grain size distribution, only a positive influence of slightly stiffening limestone fillers on the workability, deformation resistance and homogenization at mastic asphalts can be determined.

The performed practical tests show that the installation of deformation resistant mastic asphalts without temperature reducing additives is possible at maximal 230 °C. In addition to that, the exposure measurements of the "Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau)" showed, that the concentration of fumes and aerosols are distinctly below the former limit value of 10 mg/m³, also without using temperature reducing additives. Therefore the exposures are not significantly dependent on the usage of temperature reducing additives.

Summary

Research on the possibility of mastic asphalt processing at max. 230 degree centigrade without temperature reducing additives

1 Problem and aim

Due to its high deformation resistance and its sealing properties, mastic asphalt still represents an economic and high-quality construction on heavily used roads or i.e. on road bridges. Because the deformation resistance of mastic asphalt is primary based on the stiffness of its asphalt mortar, the processing requires high temperatures, due to the thermoviscous behavior. Conventionally, mastic asphalt was processed at 250 °C and partly at even higher temperatures. Under this conditions a concentration of fumes and aerosols of considerably more than 10 mg/m³ air was measured during exposure measurements in the 1990s. The processing of mastic asphalt at max. 230 °C using temperature reducing additives represents a solution to the compliance of the limit of 10 mg/m³ that was set in 2000. Because the workability and the demanded reduction of the concentration of fumes and aerosols could be detected for this kind of construction, it applies as standard construction for mastic asphalt [GÖTZ, RÜHL, 2007] since 2008. However, concerning the workability of mastic asphalt at maximal 230 °C without temperature reducing additives either the feasibility or the impact on the concentration of fumes and aerosols is resolved.

The goal of the research project was to develop mixtures for mastic asphalt without temperature reducing additives, which can be processed at 230 °C despite a high deformation resistance. In cooperation with asphalt mixing plants that have long-standing experiences in the production of mastic asphalt, optimizations on the deformation and processing behavior are conducted on the basis of laboratory studies. The practical realization of the developed mix designs was accompanied by exposure measurements of the "Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau)", whereby the emergence of fumes and aerosols during the processing of mastic asphalt without temperature reducing additives at maximal 230 °C can be evaluated.

2 Test program

For the implementation of the research project, mastic asphalt samples and mix designs were provided from eight different asphalt mixing plants. These were extensively examined in the laboratory, to emerge both general knowledge (quantification to the processing behavior and optimization of the laboratory mixing of mastic asphalt) and to develop approaches for the optimization of the several variants. Some optimized variants were tested in practice. Thus, the transmission of knowledge from the laboratory tests were validated on practice and furthermore the exposition of fumes and aerosols was valued (figure 1).

2.1 Research in the laboratory

Static according to [TP Asphalt-StB, part 20, 2007] and dynamic cone penetration tests according to [TP Asphalt-StB, part 25A1, 2009] were performed in the laboratory for the evaluation of deformation resistance. The evaluation of processing behavior was made based on the temperature-dependent

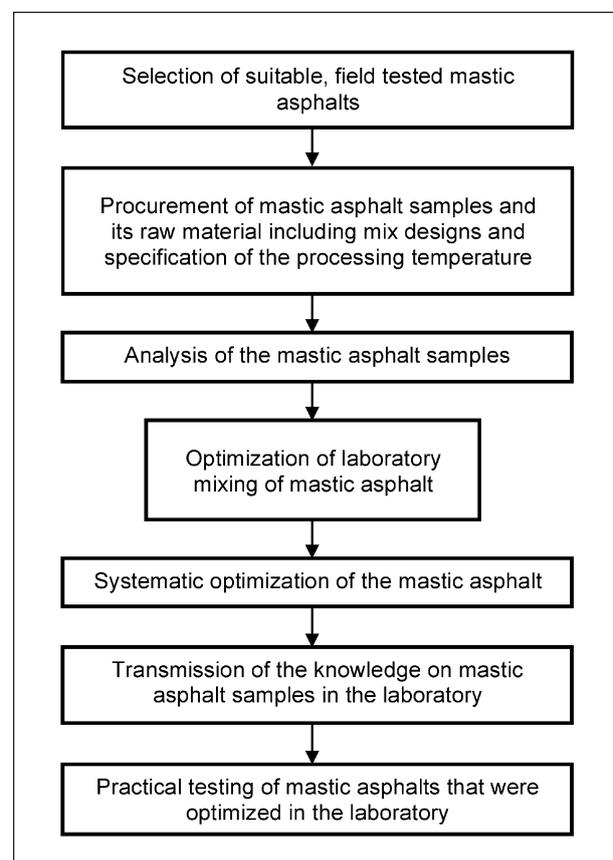


Fig. 1: Process diagram of the research program

stirring section modulus according to [M TA, 2011] (figure 2).

The components bitumen, filler, fine and coarse aggregates were examined each individually and in case of the bitumen and filler also in combination with each other. Like this – in case of the bitumen or asphalt mortar the temperature-dependent – the stiffening impact resp. the impact on the homogenous structure of the mastic asphalt were examined. Furthermore, the impact of the individual components was examined in the mastic asphalt. For that, mastic asphalts that showed the same characteristics as practice-oriented mastic asphalts from mixing plants were produced with a laboratory mixer.

2.2 Research in situ

The processing in situ was structurally monitored by an examination of processing behavior and deformation resistance. Furthermore, exposure measurements of fumes and aerosols were conducted by the Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau).

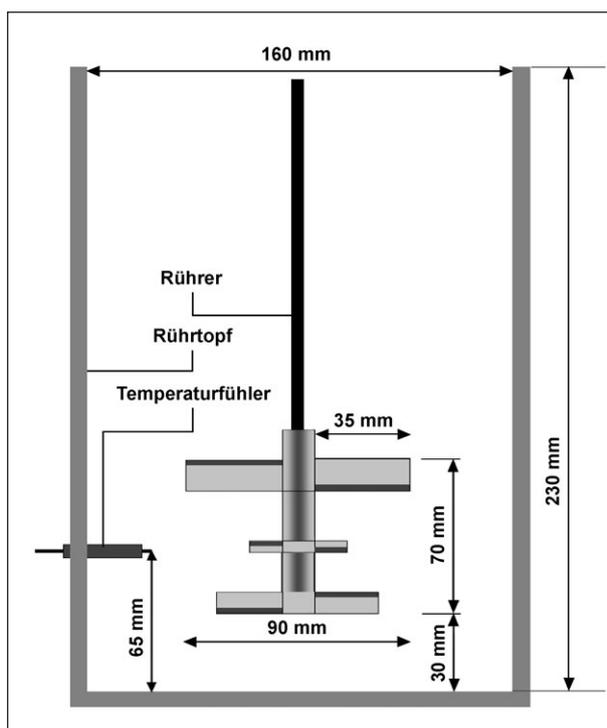


Fig. 2: Schematic figure of the modified stirrer [M TA, 2011]

3 Experimental results and evaluation of the laboratory tests

3.1 Quantitative evaluation of the workability

A proper possibility for the study of the processing behavior of mastic asphalt is represented in the “Merkblatt für Temperaturabsenkungen von Asphalt, Ausgabe 2011 [M TA, 2011]”. It describes a method for the determination of the stirring section modulus. During its controlled cooling the mastic asphalt, which was heated to a temperature of 250 °C before, is intermixed with the paddle mixer (figure 2). The modulus, which must be applied for the mixing with a speed of 30 cycles per minute, is documented as a function of asphalt temperature.

The temperature dependent stirring section modulus were determined at fourteen mastic asphalt specimen, provided from seven different asphalt mixing plants after mixing and a following homogenization in the mastic mixer (figure 3 and 4). The

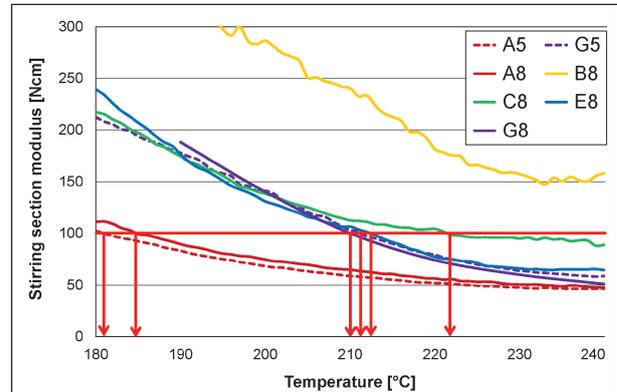


Fig. 3: Temperature dependent stirring section modulus of specimen A5, G5, A8, B8, C8, E8, G8

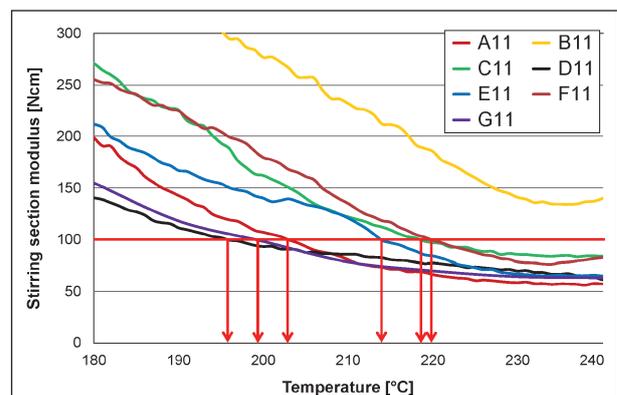


Fig. 4: Temperature dependent stirring section modulus of specimen A11, B11, C11, D11, E11, F11, G11

Mastic asphalt specimen [-]	Minimal paving temperature	
	Stirring section measurement [°C]	Manufacturer's data [°C]
A5	182	< 200
G5	211	210
A8	185	< 200
B8	> 240	220
C8	223	220
E8	212	210
G8	212	210
A11	203	200
B11	> 240	220
C11	218	220
D11	196	< 200
E11	214	210
F11	220	220
G11	200	200

Tab. 1: Minimal paving temperature of the mastic asphalt specimen according to the stirring section measurement and according to manufacturer's data

temperatures corresponding to a stirring section modulus of 100 Ncm were compared with the lowest processing temperatures of the mastic asphalts (table 1). With only two exceptions, this comparison shows, that the stirring section modulus of 100 Ncm represents a precise reference quantity for the determination of the minimal processing temperature.

3.2 Production of practice-oriented mastic asphalts employing laboratory mixer

The mastic asphalts were mixed in the laboratory using the same materials and mix designs. The production parameters were optimized in order to produce mastic asphalts in the laboratory, whose deformation and processing behavior correspond to the mastic asphalts produced at the asphalt mixing plants. The control of the material characteristics happened on the basis of the static and dynamic cone penetration tests resp. on the basis of the stirring section modulus.

The aim of a good intermixed and homogenized mastic asphalt without a harmful aging of the bitumen was achieved according to the scheme in

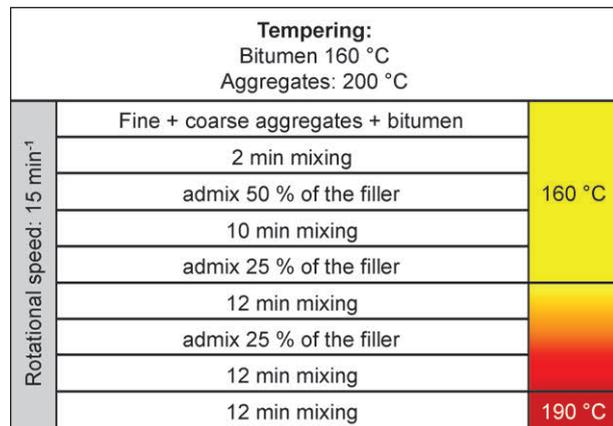


Fig. 5: Schematic figure of the optimized production process of mastic asphalt

figure 5. The minor aging is achieved by a low production temperature of maximal 190 °C and an additional flooding of the laboratory mixer with nitrogen. Nevertheless, in order to guarantee a good mixing, at the beginning of the production process only the coarse and fine aggregates, the bitumen and 50 M.-% of the filler were given into the mixer. The low stiffness that is achieved by the low amount of filler allows the mixing at 160 °C. In accordance with the increase of stiffness, which is caused by gradual increase of the filler content, the temperature of the mixture is heated continuously up to 190 °C. The selected speed of the mixer of only 15 rotations per minute causes another minimization of aging, on the one hand. On the other hand, a sufficient interval for the homogenization similar to the ratio in a mastic mixer is achieved.

3.3 Influence of the different components on mastic asphalt characteristics

The basis of a targeted optimization of the mastic asphalt mix designs is generated by examinations on the mastic asphalts given from the mixing plants and by examinations on individual mixture components.

Limestone fillers with a low stiffening impact were used for all provided mastic asphalts. Examinations on asphalt mortar show a rheological behavior by strongly stiffening fillers, which influences the mastic asphalt characteristics actually in a positive way. In the temperature range of about 30 to 90 °C these fillers stiffen the asphalt mortar significantly more

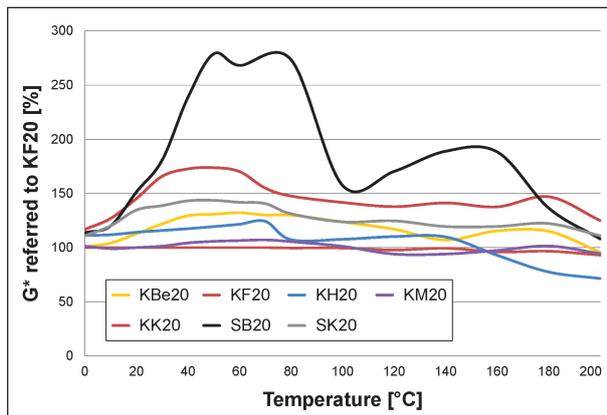


Fig. 6: Temperature dependent stiffening impact of selected fillers by reference to the complex shear modulus (bitumen 20/30, mixing ratio F/B=70/30)

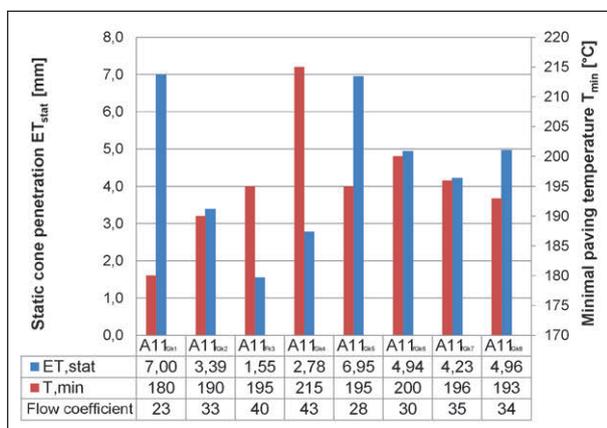


Fig. 7: Static cone penetration, minimal paving temperature and flow coefficient of the variants A11_{FGk1} to A11_{FGk8}

than in the temperature range over 100 °C (see temperature dependent complex shear modulus by examination employing the Dynamic Shear Rheometer in figure 6). The desired increase of the resistance to deformation is therefore higher than the increase of processing resistance. The necessary reduction of the filler content using stronger stiffening fillers entails, that the mastic asphalt is less homogenous and also not free of voids. Thus, usage of less stiffening limestone fillers is most qualified for the production of mastic asphalt.

The impact of fine aggregates was exemplarily analyzed on a mastic asphalt MA 11 S, which was produced using eight different fine aggregates. Examinations of deformation behavior (static and dynamic cone penetration tests) and workability (stirring resistance measurement) show (by the examined MA 11 S), that fine aggregates with a higher flow coefficient increase deformation resistance more than workability resistance (figure 7). This knowledge, by which a striven building

practice given maximal workability resistance by the usage of fine aggregates with preferably high flow coefficient was achieved, could not be confirmed by other variants. Some mastic asphalts show a homogenous behavior only by using less stiffening fine aggregates, so that a generally valid statement about the effect of fine aggregates in mastic asphalt could not be made.

The coarse aggregates should be composed so that the void content in the aggregate structure of mastic asphalt is minimal. That is how a mastic asphalt can be produced, in which a relatively small amount of asphalt mortar is enough to produce a sufficient workability and no of voids. Due to the small amount of asphalt mortar, a high deformation resistance is achieved.

An analysis of the mastic asphalts from the mixing plants shows that mastic asphalt with a lower bitumen content have tendentially higher deformation resistance despite sufficient workability. The fact, that the mastic asphalt variants with the best properties exhibit the highest binder contents, also shows that no generally valid statement on the optimal binder content can be given.

4 Practical testing

4.1 Developed mastic asphalt variants for practical testing

Eleven mastic asphalt mixtures from eight asphalt mixing plants were optimized, so that their workability without temperature reducing additives is possible at maximal 230 °C and still a high deformation resistance is achieved. The requirements for the deformation resistance basically correspond to the requirements for mastic asphalts MA 5 S, MA 8 S resp. MA 11 S. Only in one case the requirements for an MA 5 N were complied, because this mixture had to show a good workability by low requirements towards the deformation resistance.

Beginning with the mix designs, with which mastic asphalts using temperature reducing additives were produced in the respective mixing plants, the individual components were matched to the optimal mix design without temperature reducing additives. The mastic asphalts listed in table 2 were designed like this and matched all set requirements – workability at maximal 230 °C and deformation

Mastic asphalt [-]	ET _{stat, 30}		ET _{stat, Δ30-60}		ET _{dyn, 2500}	T _{min}
	Measurement [mm]	Limit value [mm]	Measurement [mm]	Limit value [mm]	Measurement [mm]	Measurement [mm]
MA 5 S (Dortmund)	1,9	1,0 – 3,0	0,2	≤ 0,4	1,1	215
MA 5 S (Duisburg)	3,1	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	3,7	227
MA 8 S (Bischofsheim)	1,9	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	1,0	214
MA 8 S (Dortmund)	2,7	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	1,7	220
MA 8 S (Hamburg)	2,2	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,7	207
MA 8 S (Neu-Bamberg)	2,3	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	0,3	208
MA 8 S (Oberhausen)	2,9	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,6	183
MA 11 S (Bischofsheim)	2,0	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,5	197
MA 11 S (Bremen)	2,8	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	2,3	206
MA 11 S (Dortmund)	2,3	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	1,7	223
MA 11 S (Hamburg)	1,8	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,2	223

Tab. 2: Summary of the static and dynamic cone penetration tests and the minimal installation temperature of the optimized mastic asphalts

resistance of a mastic asphalt MA 5 S, MA 8 S resp. MA 11 S – on the basis of the results of the laboratory tests.

4.2 Practical testing and exposition measurement

Test fields were made manually on the property of “Berufsförderwerkes der Bauindustrie NRW e.V.” and on the premises of “Zeche Zollverein” in Essen. The processing temperature amounted about 220 °C in case of the MA 5 S on the property of “Berufsförderwerkes der Bauindustrie NRW e.V.” and about 230 °C in case of the MA 8 S on the grounds of “Zeche Zollverein”. Despite high deformation resistance, which especially the MA 8 S exhibits with a static cone penetration of 2,7 mm after 30 minutes resp. a dynamic cone penetration of 1,7 mm after 2,500 loading cycles, the mastic asphalts without temperature reducing additives were workable at maximal 230 °C.

The mastic asphalt MA 8 S on the BAB A 61 between the junctions Waldlaubersheim and Stromberg could be paved at about 220 °C. Nevertheless, the deformation resistance of this mastic asphalt without temperature reducing additives, with static cone penetrations 2,3 mm after 30 minutes corresponds to the requirements of mastic asphalt MA 8 S. During the constructional measure on BAB A 57 between the junctions Alpen and Sonsbeck a mastic asphalt without temperature reducing additives was



Fig. 8: Measurement of fumes and aerosols during the processing of mastic asphalt without temperature reducing additives on BAB A 61 (arrow indicates stationary measuring section) [BG Bau, part 3]

installed at 248 °C and a mastic asphalt using temperature reducing additives was installed at 220 resp. 225 °C for comparative purposes. The mastic asphalt paved at 248 °C showed in situ a slightly better workability.

At all six road works exposure measurements at workplace were implemented by “BG Bau”. Hereto, the concentration of fumes and aerosols were measured stationary in immediate installation area and with portable measuring devices in the area of the individual employees (figure 8). In table 3 the determined fumes and aerosols are summarized separated by road works and workspace. In the cases, in which the measurement results are below

Building project		Concentration of fumes and aerosols [mg/m ³]				
		Smoother/foreman	Smoother	Mastic mixer	Barrow	Stationary measurement
1	Essen, Berufsförderwerk der Bauindustrie NRW e. V.			< 0,41	0,48	0,61
2	Essen, Zeche Zollverein	0,41	0,48	3,13	1,09	0,34
		Mastic mixer	Smoother, right	Smoother, left	Driver	Stationary measurement
3	BAB A 57, Section 1 (T = 248 °C)	7,49	3,74	4,49	< 0,41	8,17
4	BAB A 57, Section 2 (T = 220 °C, temperature reducing additives)	2,18	< 0,54	1,70	< 0,54	
5	BAB A 57, Section 3 (T = 225 °C, temperature reducing additives)	4,63	< 0,41	1,29	< 0,41	
6	BAB A 61	3,61	1,36	1,91	0,54	3,00

Tab. 3: Concentration of fumes and aerosols of different road works [BG Bau]

detection limit, the respective minimal detectable value is indicated.

With a maximal concentration of 3,61 mg fumes and aerosols per m³ air, the results of the exposure measurements during processing of mastic asphalt at maximal 230 °C without temperature reducing additives was distinctly below the earlier maximum value of 10 mg/m³. Moreover, the measurements show, that concentration of fumes and aerosols is primarily dependent on processing temperature and not on the usage of temperature reducing additives.

5 Summary and perspective

Since 2008, for the reduction of fumes and aerosols, the exposure description for processing of mastic asphalt provide the processing of mastic asphalt only using temperature reducing additives at a maximal temperature of 230 °C. Therefore, the aim of the research project entailed to examine the possibility of processing deformation resistant mastic asphalt without temperature reducing additives at maximal 230 °C and additionally the detection of fumes and aerosols.

For a convincing and practice-oriented examination of mastic asphalts in laboratory, methods for the production of practice-oriented mastic asphalt employing the laboratory mixer needed to be developed and a valuation background for the quantification of the processing methods should be created.

The mastic asphalt was produced in laboratory by means of a gradually addition of the filler during the mixing process, a hereby allowed low mixing temperature of 160 to 190 °C, a low rotational speed and a long mixing period of 48 minutes. The characteristics of this mastic asphalt match the ones that are produced in a mixing plant and were homogenized in a mastic mixer.

On fourteen mastic asphalt variants a stirring section modulus of 100 Ncm during the determination of the processing resistance according to [M TA, 2011] was determined as a reference value. A lower deviation than this reference value assures a good workability.

A systematic optimization of the components bitumen, filler, fine and coarse aggregates shows in a lot of cases a distinctive dependence on the other components. The usage of slightly stiffening limestone filler and a continuous grain size distribution causes a generally valid positive influence on the characteristics of mastic asphalt.

The performed practical testing showed, that processing of deformation resistant mastic asphalt (MA 5 S, MA 8 S resp. MA 11 S) without temperature reducing additives at maximal 230 °C is possible. From the exposure measurements of "Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau)" follows, that the concentration of fumes and aerosols is not significantly dependent on the usage of temperature reducing additives. Also without their usage, maximal values of 3,61 mg/m³ were measured, that were distinctly below the earlier limit value of 10 mg/m³.

On basis of this research project, there are no constructional or health concerns against processing of mastic asphalt without temperature reducing additives at maximal 230 °C. Additionally, more exposure measurements of "BG Bau" guided building projects with comparable or identical concepts could possibly be performed.

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	13	4.5.1 Auswahl und Untersuchung der Bitumen	28
2	Zielsetzung	13	4.5.2 Auswahl und Untersuchung der Füller	29
3	Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse	14	4.5.3 Auswahl, Herstellung und Untersuchung der Asphaltmörtel.	30
3.1	Temperaturabsenkung bei der Asphaltverarbeitung	14	4.5.4 Untersuchungen der feinen Gesteinskörnungen	32
3.1.1	Entstehung der Dämpfe und Aerosole aus Bitumen	14	4.5.5 Untersuchungen der groben Gesteinskörnungen	33
3.1.2	Auswirkungen der Dämpfe und Aerosole aus Bitumen	14	4.6 Übertragung der systematischen Optimierungsmaßnahmen auf die Basis-Gussasphalte	34
3.1.3	Entwicklung des Regelwerks zur Temperaturabsenkung	15	4.7 Praxiserprobung	34
3.2	Zusammensetzung des Gussasphalts	16	5 Versuchsergebnisse	35
3.3	Bestimmung der Parameter zur Optimierung der Zusammensetzung des Gussasphalts.	17	5.1 Kennwerte der Basis-Gussasphalte	35
3.3.1	Bindemittelüberschuss	17	5.1.1 Zusammensetzung der Basis-Gussasphalte	35
3.3.2	Fließkoeffizient	18	5.1.2 Verarbeitbarkeit der Gussasphalte	35
3.3.3	Versteifende Wirkung des Füllers.	18	5.1.3 Verformungsbeständigkeit der Basis-Gussasphalte	36
3.4	Herstellung von Gussasphalt	21	5.2 Bestimmung des maximalen Rührwiderstandsmomentes zum Einbau von Gussasphalt.	37
3.5	Überprüfung der Gussasphalteeigenschaften	21	5.3 Optimierung des labortechnischen Herstellens von Gussasphalt	38
3.5.1	Verarbeitbarkeit	21	5.4 Ergebnisse der systematischen Optimierungsansätze	39
3.5.2	Verformungsbeständigkeit	24	5.4.1 Granulometrische Kennwerte der Füller	39
4	Beschreibung der durchgeführten Versuche	25	5.4.2 Kennwerte der Bitumen und Asphaltmörtel	40
4.1	Versuchsprogramm	25	5.4.3 Eigenschaften der Gussasphalte unter Verwendung der unterschiedlichen Füller	41
4.2	Auswahl und Beschaffung praxiserprobter Gussasphalte	25	5.4.4 Kennwerte der feinen Gesteinskörnungen und der damit hergestellten Gussasphalte	42
4.3	Untersuchung der Basis-Gussasphalte	26	5.4.5 Resultate der Rüttelversuche	43
4.4	Labortechnische Herstellung des Gussasphaltes	26		
4.5	Auswahl und Untersuchung der verschiedenen Komponenten zur systematischen Optimierung	28		

6	Bewertung der Ansätze zur systematischen Optimierung	44	Literatur	66
6.1	Beurteilung der Basis-Gussasphalte	44	Bilder	69
6.1.1	Vergleich der statischen und dynamischen Eindringtiefe	44	Tabellen	72
6.1.2	Zusammenhang zwischen Verarbeitungs- und Verformungsverhalten der Basis-Gussasphalte	44	Anhang	74
6.1.3	Bewertung der Basis-Gussasphalte	45		
6.2	Eigenschaften und Einflüsse Füller	45		
6.2.1	Zusammenhang zwischen den granulometrischen Eigenschaften und der versteifenden Wirkung (ΔEP_{RuK}) der Füller	45		
6.2.2	Kälteverhalten der Mörtel mittels BBR	46		
6.2.3	Duktilitätsverhalten der Mörtel	47		
6.2.4	Temperaturabhängig versteifende Wirkung mittels DSR	49		
6.2.5	Allgemeine Bewertung der untersuchten Füller	52		
6.2.6	Eignung der Füller für Gussasphalt	54		
6.3	Eigenschaften und Einflüsse feiner Gesteinskörnungen	55		
6.3.1	Systematische Zusammenhänge zwischen Fließkoeffizient und Gussasphalteigenschaften	55		
6.3.2	Bewertung der untersuchten feinen Gesteinskörnungen	55		
6.4	Eigenschaften und Einflüsse feiner Gesteinskörnungen	56		
7	Praxiserprobung	57		
7.1	Gussasphalt-Rezepturen ohne viskositätsverändernde Zusätze	57		
7.1.1	Ausgewählte Gussasphalt-Rezepturen	57		
7.1.2	Eigenschaften der ausgewählten Gussasphalt-Varianten	59		
7.2	Erprobungen in situ	61		
8	Zusammenfassung	64		

1 Einleitung und Problemstellung

Das stetig wachsende Verkehrsaufkommen auf deutschen Autobahnen erfordert den Bau verformungsresistenter und langlebiger Fahrbahnbefestigungen. Bei besonderen Belastungen, die vor allem durch den Anstieg des Schwerverkehrsaufkommens zu verzeichnen sind, sieht das [ARS Nr. 5/2005] als eine der Regelbauweisen eine Deckschicht aus Gussasphalt vor. Zudem sind Deckschichten aus Gussasphalt im Allgemeinen langlebiger als Deckschichten aus Walzasphalt. So sehen die Empfehlungen der [RPE-Stra, 2001] zwischen Neubau und Erhaltungsmaßnahme bei Gussasphaltdeckschichten deutlich längere Nutzungszeiträume als bei Walzasphalt vor.

Für den Einbau von Gussasphalt sind aufgrund seiner Zusammensetzung und des thermoviskosen Verhaltens bitumenhaltiger Bindemittel hohe Verarbeitungstemperaturen erforderlich. Dadurch liegen bei konventionellem Gussasphalteinbau (Einbautemperatur: 250 °C) die Emissionen aus Dämpfen und Aerosolen sehr hoch.

In den vergangenen Jahren wurden Forschungen mit dem Ziel durchgeführt, die Einbautemperatur signifikant zu senken. Dies konnte durch den Einsatz von viskositätsverändernden Zusätzen erreicht werden. Da zudem eine deutliche Reduzierung der Dampf- und Aerosolbildung nachgewiesen werden konnte, ist die Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °C und unter Zuhilfenahme der vorgenannten Zusätze seit 2008 die Regelbauweise. Die Verarbeitung von Gussasphalt bei abgesenkten Temperaturen ohne Zusätze ist dagegen bislang weder bezüglich der Verarbeitbarkeit noch bezüglich der Entwicklung von Dämpfen und Aerosolen hinreichend untersucht worden.

2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes ist die Optimierung praxiserprobter Gussasphalte, um diese ohne den Einsatz viskositätsverändernder Zusätze bei maximal 230 °C verarbeiten zu können. Dazu sind die Einflüsse der einzelnen Komponenten (Bitumen, Füller, feine und grobe Gesteinskörnung) auf die Eigenschaften des Gussasphalts systematisch zu erfassen. Anhand der so gewonnenen Erkenntnisse sind die Zusammensetzungen der Praxisproben zu optimieren.

Grundlage der Forschungen bilden praxiserprobte, additivierte Gussasphalte für besondere Beanspruchungen (MA 5 S, MA 8 S und MA 11 S). Diese sind von mehreren, über das Gebiet Deutschlands verteilten Mischwerken zu beschaffen, die über langjährige Erfahrungen mit der Herstellung von Gussasphalt verfügen. Eine vergleichende Analyse dieser Praxisproben soll bereits erste Aufschlüsse darüber liefern, welche Einflüsse unterschiedliche Zusammensetzungen auf die Asphalteigenschaften haben.

Zudem dienen die Rezepturen der Praxisproben als Basis für die Herstellung temperaturabgesenkter Gussasphalte ohne viskositätsverändernde Zusätze. Um dies zu erreichen, soll die Zusammensetzung gezielt optimiert werden. Dazu sind die Einflüsse der verschiedenen Komponenten (unabhängig von den Praxisproben) vorab systematisch zu untersuchen:

- Der Einfluss unterschiedlicher Füller bzw. Zusätze auf den Asphaltmörtel und damit auf den Gussasphalt. Dabei sind die versteifenden Eigenschaften dieser Füller in Abhängigkeit von der Temperatur zu analysieren. Das Ziel ist die Bestimmung von einzelnen Füllern oder Gemischen, deren versteifende Wirkung bei Verarbeitungstemperaturen im Vergleich zu den Gebrauchstemperaturen gering sind.
- Der Einfluss unterschiedlicher Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen beziehungsweise des Gemischs verschiedener feiner Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Fließkoeffizienten. Dabei sind die Zusammenhänge zwischen den Fließkoeffizienten und den Asphalteigenschaften aufzuzeigen.
- Durch Rüttelversuche sollen die Auswirkungen verschiedener grober Gesteinskörnungen auf den Hohlraumgehalt des Gesteinskörnungsgemischs bestimmt werden. Da der Bindemittelüberschuss mit Verringerung des Hohlraumgehalts zunimmt, kann darüber das Verarbeitungsverhalten des Gussasphalts verbessert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Einflüsse der verschiedenen Komponenten sind auf die Praxisproben (ohne viskositätsverändernde Zusätze) zu übertragen. Durch eine gezielte Optimierung der Zusammensetzung soll zunächst im Labor das Verarbeitungs- und das Verformungsverhalten untersucht werden. Lassen die so gewonnenen Ergebnisse den Schluss zu, dass die Gussasphalte bei

der veränderten Rezeptur bei maximal 230 °C verarbeitbar und dennoch verformungsbeständig sind, werden diese der Praxiserprobung zugeführt. Bei der Praxiserprobung ist die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Praxis zu überprüfen. Zudem sind Expositionsmessungen durch die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) durchzuführen.

3 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse

3.1 Temperaturabsenkung bei der Asphaltverarbeitung

3.1.1 Entstehung der Dämpfe und Aerosole aus Bitumen

Der Gehalt kanzerogener Bestandteile im Bitumen ist im Vergleich zu dem bis in die 1980er Jahre im Straßenbau verwendeten Teer um Zehnerpotenzen geringer. So liegt der Anteil der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH), die durch eine Metabolisierung in krebserzeugende Verbindungen umgewandelt werden können [WALTER, 2006], im Bitumen um den Faktor 3.000 bis 10.000 niedriger [STOLZ, WEGMANN, 2001].

Da die gesundheitlichen Auswirkungen nicht direkt von den Bestandteilen der Bitumen, sondern von deren Emissionen abhängen, dient die Exposition an Dämpfen und Aerosolen entscheidend zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen. Die entstehenden Aerosole sind dispers in der Luft verteilte Partikel mit einem im Mittel um den Faktor 10 [BRANDT, 1990] geringeren Molekulargewicht als Bitumen. Da die chemische Zusammensetzung der Aerosole genauso komplex ist wie die der Bitumen selbst [STOLZ, WEGMANN, 2001], werden in Deutschland zu ihrer Bestimmung die aliphatisch gebundenen Kohlenwasserstoffe der gesamten Emissionen bestimmt [BMA, 1997].

Die Emissionen an Dämpfen und Aerosolen aus Bitumen, die nach [Gesprächskreis Bitumen, 2009] unter 80 °C praktisch nicht vorhanden sind, nehmen gemäß [BRANDT, CORDINGLEY, 1993] mit Erhöhung der Temperatur exponentiell zu. Zudem bewirkt gemäß [STOLZ, WEGMANN, 2001] eine Erhöhung der Temperatur eine deutliche Steigerung des Anteils an Aerosolen in dem im Allgemeinen zusammengefassten Gemisch aus Dämpfen und

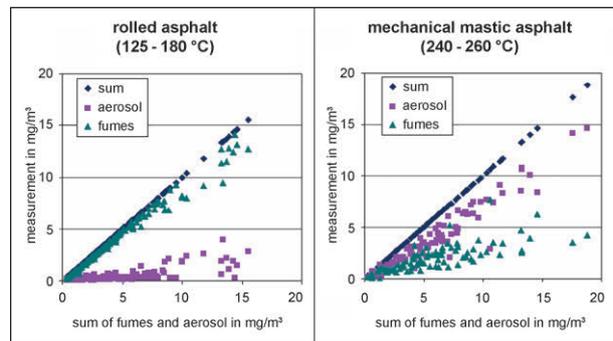


Bild 1: Anteile der Dämpfe und Aerosole am Gesamtmesswert [RÜHL et al.]

Aerosolen. Dies wird durch einen Vergleich der Emissionen während des Einbaus von Walz- und Gussasphalt deutlich (Bild 1). Bei dem zwischen 125 und 180 °C eingebauten Walzasphalt bestehen die als Dämpfe und Aerosole zusammengefassten Emissionen fast ausschließlich aus Dämpfen. Bei konventionellem Gussasphalteinbau (240 bis 260 °C) werden dagegen mehr Aerosole als Dämpfe freigesetzt.

Ein weiterer grundsätzlicher Unterschied wird von [STOLZ, WEGMANN, 2001] beschrieben. Im Gegensatz zu polymermodifizierten Bitumen, bei denen die Emissionsraten von den verwendeten Polymeren abhängen, nehmen die Emissionen bei zunehmender Härte der Bitumen ab. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit werden die harten Bitumen jedoch oft mit Zusätzen ergänzt, um ihre Anwendungseigenschaften zu verbessern.

Die Provenienz der Bitumen beeinflusst nach [KNECHT, WOITOWITZ, 1997] ebenfalls die Emissionen der Bitumen.

3.1.2 Auswirkungen der Dämpfe und Aerosole aus Bitumen

Da zur Beurteilung der Wirkung der Dämpfe und Aerosole auf die Asphaltarbeiter die Verarbeitungstemperatur, und damit die Menge und die stoffliche Zusammensetzung der Emissionen, maßgeblichen Einfluss hat, wurden in den letzten Jahren einige Studien unter Praxisbedingungen durchgeführt. Ein aktuelles und aufschlussreiches Beispiel dafür ist die „Humanstudie Bitumen“ des Berufsgenossenschaftlichen Forschungsinstituts für Arbeitsmedizin (BGFA). Bei dieser Studie wurden 320 Gussasphaltarbeiter und eine Referenzgruppe von 118 Arbeitern, die keine bitumenexponierten Tätigkeiten ausüben, gesundheitlich untersucht. Als

Ergebnis wurde veröffentlicht, dass die Lungenfunktionsbefunde weitestgehend unauffällig waren. Folglich konnte kein offensichtlich erhöhtes Lungenkrebsrisiko durch den Umgang mit heißem Bitumen festgestellt werden. Quantitative Zusammenhänge zwischen Belastung und der daraus resultierenden Wirkung konnten jedoch nicht bestimmt werden [Gesprächskreis Bitumen, 2009].

Die epidemiologische Studie der „International Agency for Research on Cancer (IARC)“ resümiert ebenfalls mit der Beurteilung, dass ein starkes Krebsrisiko bei der den Untersuchungen zugrundeliegenden Bitumenexposition auszuschließen ist. Dennoch wird in dieser Studie empfohlen, dass sowohl die Inhalation der Dämpfe und Aerosole, als auch der Kontakt mit dem Bitumen selbst, minimiert werden sollte [REIFIG, 2009].

3.1.3 Entwicklung des Regelwerks zur Temperaturabsenkung

Im Herbst 1996 wurden in Deutschland Luftgrenzwerte für Dämpfe und Aerosole aus Bitumen bei der Heißverarbeitung festgelegt. Diese ersten Grenzwerte betragen 20 mg/m^3 in Innenräumen und 15 mg/m^3 für alle übrigen Arbeiten [Gesprächskreis

Bitumen, 2009]. Dabei war weder das gesundheitliche Risiko, noch die technische Möglichkeit zur Einhaltung der Grenzwerte bekannt.

Während zur Beurteilung der gesundheitlichen Auswirkungen noch immer Studien durchgeführt werden, konnte die Möglichkeit zur Einhaltung der Grenzwerte anhand von Arbeitsplatzmessungen überprüft werden. Diese führten zu dem Ergebnis, dass bei den meisten Asphaltarbeiten unter freier Luftbewegung eine Konzentration von 10 mg/m^3 nicht überschritten wird. Eine Ausnahme bildeten jedoch die Gussasphaltarbeiten, bei denen die Exposition vereinzelt bis zu 60 mg/m^3 betrug [GÖTZ, RÜHL, 2007]. Als Folge daraus wurden im Jahr 2000 der Grenzwerte für Dämpfe und Aerosole aus Bitumen auf 10 mg/m^3 abgesenkt. Für Gussasphaltarbeiten wurden die Grenzwerte dagegen zunächst für zwei und im Anschluss daran für weitere fünf Jahre ausgesetzt [GÖTZ, RÜHL, 2007].

Während der sieben Jahre, in denen die Grenzwerte ausgesetzt wurden, schritten die Entwicklungsarbeiten zur Reduzierung der Dämpfe und Aerosole zielführend voran. Das Produkt dieser Forschungen waren insbesondere viskositätsverändernde Zusätze, durch deren Einsatz die Einbautemperaturen gesenkt werden konnten. Beispiele dafür sind Fett-

	Anzahl	Minimalwert	50-Perzentil	95-Perzentil	Maximalwert
herkömmlicher Gussasphalt (gemessene Verarbeitungstemperaturen von 220 – 260 °C)					
im Freien					
Zapfer	64	0,4	6,3	57,8	75,4
Bohlenföhler	90	0,3	3,7	38,2	45,9
Glätter	46	0,1	1,5	10,0	14,0
Splittstreuer	6	0,5	-	-	4,0
in Räumen					
Zapfer	9	7,0	-	-	23,5
Bohlenföhler	22	0,9	5,8	40,2	59,1
Glätter	17	0,5	4,1	6,5	6,6
Splittstreuer	4	1,2	-	-	1,8
temperaturabgesenkter Gussasphalt (gemessene Verarbeitungstemperaturen von 205 – 230 °C)					
im Freien					
Zapfer	30	0,3	2,5	6,8	7,8
Bohlenföhler	33	0,3	3,8	9,5	11,9
Glätter	19	0,3	0,5	1,6	2,4
Splittstreuer	6	0,5	-	-	4,0

Tab. 1: Übersicht über die Expositionen für Dämpfe und Aerosole aus Bitumen beim maschinellen Einbau von Gussasphalt [Expositionsbeschreibung, 2008]

säureamide, Fischer-Tropsch-Wachse oder Montanwachse. Diese bewirken gemäß [M TA, 2011] im Verarbeitungstemperaturbereich eine Reduzierung und im Gebrauchstemperaturbereich eine Erhöhung der Viskosität. Als Konsequenz daraus wurde der Einbau von Niedrigtemperaturgussasphalt im Frühjahr 2007 zum Stand der Technik erklärt, wodurch der Gussasphalt seit 2008 nur noch bei Temperaturen von maximal 230 °C einzubauen ist [GÖTZ, RÜHL, 2007]. Zur praktischen Handhabung wurden dazu Expositionsmessungen an Baustellen durchgeführt, die die Reduzierung der Dämpfen und Aerosolen auf weniger als 10 mg/m³ unter definierten Arbeitsbedingungen nachweisen (Tabelle 1). Diese Arbeitsbedingungen, die im Wesentlichen die maximalen Einbautemperatur und die Verwendung viskositätsverändernder Zusätze beinhalten, sind in [Expositionsbeschreibung, 2008] zusammengefasst. Bei Einhaltung der Expositionsbeschreibung sind keine weiteren Nachweise zu führen, während bei jeder Abweichung Untersuchungen bezüglich der gesundheitlichen Auswirkungen auf die Arbeiter durchzuführen sind.

3.2 Zusammensetzung des Gussasphalts

Gussasphalt ist im Gegensatz zum Walzasphalt ein reines Zwei-Phasen-Gemisch, bestehend aus Bitumen und Gesteinskörnungen. Die Hohlräume, die im Walzasphalt zur Ausbildung eines stabilen Korngerüsts erforderlich sind, werden im Gussasphalt nahezu vollständig durch das in einer größeren Menge vorhandene Bitumen (beziehungsweise den Asphaltmörtel) geschlossen. Folglich beruht seine Verformungsbeständigkeit primär auf der Härte des Mörtels.

Durch die Art und Menge des verwendeten Bitumens werden die Eigenschaften des Gussasphalts wesentlich beeinflusst. Bei zu geringen Zugabemengen ist der Gussasphalt selbst bei hohen Temperaturen nicht oder nur schlecht zu verarbeiten. Zu große Bindemittelmengen verringern dagegen die Verformungsbeständigkeit und erhöhen die Rissanfälligkeit bei tiefen Temperaturen und schnellen Temperaturstürzen [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2001]. Trotz des positiven Einflusses auf die Verarbeitbarkeit sind weiche Bitumen aufgrund der Reduzierung der Verformungsbeständigkeit gemäß [TL Asphalt-StB; 2007] für die Herstellung von Gussasphalt nicht zulässig. Hartbitumen

alleine sind dagegen im Straßenbau nicht geeignet und werden daher nur in Gussasphaltestrichen verwendet. Polymermodifizierte Bitumen kommen trotz der teilweise kritisch gesehenen Auswirkungen der hohen Temperaturen auf die Polymere im Gussasphalt regional zum Einsatz. Die Verwendung der viskositätsverändernden Zusätze zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit ist dagegen gemäß Kapitel 3.1.3 bei Einhaltung der Expositionsbeschreibungen seit 2008 vorgeschrieben.

Da die aufgetragenen Lasten im Gussasphalt nicht über die Kornverspannungen abgetragen werden können, muss der aus Bitumen und Füller (seit Inkrafttreten der [TL Asphalt-StB, 2007] die Gesteinskörnung mit einem maximalen Durchmesser von 0,063 mm) bestehende Mörtel sehr steif sein. Daher ist der Zugabeanteil des Füllers selbst im Verhältnis zu dem hohen Bindemittelgehalt sehr hoch. Folglich beeinflusst die Qualität und die Menge des Füllers die Eigenschaften des Gussasphalts entscheidend. Während zu stark versteifende Füller die Verarbeitung unmöglich machen, reduzieren zu schwach versteifende Füller die Verformungsbeständigkeit des Asphalts. Über die grundsätzliche Eignung von Füllern verschiedener Gesteinsarten wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Danach sollten gemäß [SCHELLENBERGER et al., 2000] vor allem in hochbelasteten Deckschichten von Autobahnen ausschließlich Kalksteinmehle verwendet werden, da diese die Verarbeitbarkeit und die Haftung positiv beeinflussen. Zur Verbesserung der Eigenschaften wird ein geringer Teilersatz des Kalksteins durch Kalkhydrat empfohlen. Durch seine versteifende Wirkung erhöht das sehr feinkörnige Kalkhydrat die Verformungsbeständigkeit des Asphalts. Zudem wird das Quellen verringert und die Haftung zwischen Bitumen und Gestein verbessert [BUCHTA, KUNESCH, 2006]. Neben dem im Walzasphalt bereits bewährten Kalkhydrat existieren weitere Ansätze zur Verwendung anderer Zusätze. Nach [KADELKA, 1988] bewirkt beispielsweise die Verwendung von feinteiligem Gasbeton bereits in geringen Mengen eine deutliche Versteifung des Gussasphalts.

Die feinen Gesteinskörnungen (Durchmesser < 2 mm) üben durch ihre Kornform, Kantigkeit und Oberflächenbeschaffenheit bzw. die daraus resultierende innere Reibung, entscheidenden Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit aus. Daher sind in [TL Asphalt-StB, 2007] für Gussasphalte für besondere Beanspruchungen Anforderungen an die innere Reibung gestellt, die über den Fließkoeffi-

zienten ausgedrückt werden. Die Einhaltung eines minimalen Fließkoeffizienten bei einem vorgegebenen Teil der feinen Gesteinskörnung hat dabei die Anforderungen an ein bestimmtes Brechsand/Natur-sand-Verhältnis abgelöst. Gemäß Bild 2 ist mit dem geforderten Anteil an feiner Gesteinskörnung mit einem Fließkoeffizient E_{CS35} ein entsprechender Anteil an Brechsand wahrscheinlich.

Die positive Auswirkung feiner Gesteinskörnungen mit hohen Fließkoeffizienten wurden in [WÖRNER et al., 2008] für Gussasphalt anhand der dynamischen Eindringtiefe nachgewiesen.

Die groben Gesteinskörnungen dienen vor allem der Sicherstellung einer ausreichenden Verformungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen. Zusammen mit den feinen Gesteinskörnungen beeinflussen diese zudem die Verarbeitbarkeit durch ihre Lagerungsdichte. Sind nur wenige Hohlräume im Gesteinskörnungsgemisch vorhanden, so ist zum Füllen nur wenig Bitumen bzw. Mörtel notwendig. Dadurch entsteht ein hoher, mit der Ausdehnung des Bitumens bei Verarbeitungstemperatur anwachsender Bitumenüberschuss (Bild 3). Als op-

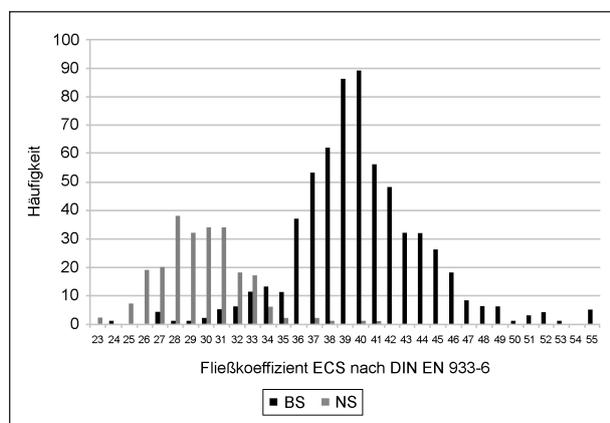


Bild 2: Häufigkeitsverteilung der Fließkoeffizienten bei Brechsand und Natursand [WÖRNER et al., 2008]

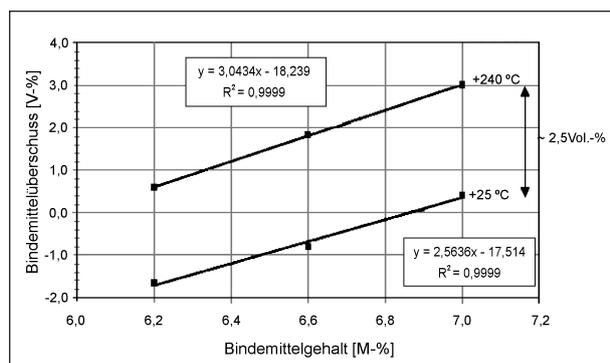


Bild 3: Bindemittelüberschuss in Abhängigkeit von der Temperatur [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2001]

timaler Bindemittelüberschuss, der sowohl eine hohe Wärmestandfestigkeit als auch eine ausreichende Verarbeitbarkeit erlaubt, wird in [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2001] ein Bindemittelüberschuss von 1,0 Vol.-% bei einer Temperatur von 240 °C empfohlen.

3.3 Bestimmung der Parameter zur Optimierung der Zusammensetzung des Gussasphalts

3.3.1 Bindemittelüberschuss

Zur Bestimmung des Bindemittelüberschusses ist der fiktive Hohlraumgehalt (Summe aus Hohlraumgehalt und Bindemittelvolumen) des Gussasphalts zu ermitteln. Dazu ist neben dem Bindemittelvolumen die Trockenraumdichte (Raumdichte des Gesteinskörnungsgemischs ohne Bindemittel) zu bestimmen. Da das Bitumen jedoch als Schmierung zwischen den Gesteinskörnungen wirkt, ist die Trockenraumdichte auch bei dem während des Einbaus nicht zu verdichtenden Gussasphalt ungleich der Schüttdichte. Um eine Lagerungsdichte zu erzeugen, die der Trockenraumdichte des Gussasphalts entspricht, sind einige Verfahren in der Literatur beschrieben:

Rütteldichte nach KREBS, ARAND

In [KREBS, ARAND, 1976] wird ein Verfahren beschrieben, bei dem das Aufbringen einer Druckkraft in Form einer harmonischen Schwingung auf das Gesteinskörnungsgemisch einwirkt. Während der dabei periodisch auftretenden normalspannungsfreien Phasen wird das Gesteinskörnungsgemisch durch Kornumlagerungen verdichtet. Zur Versuchsdurchführung werden unabhängig von der Kornzusammensetzung folgende Parameter empfohlen:

- Durchmesser des Rütteltopfs: 100 mm,
- Masse des Rüttelguts: 1.000 g,
- Flächenpressung: 0,27 bar,
- Beschleunigung: $19,5 \cdot g$,
- Rütteldauer: 5 Minuten.

Die Übereinstimmung zwischen der ermittelten Rütteldichte und der angestrebten Trockenraumdichte, die an Asphaltproben gleicher Gesteinskörnungszusammensetzung ermittelt wurden, ist vor allem

bei füllerreichen Gemischen sehr gut. Bezüglich der Kornzertrümmerung geben KREBS und ARAND einen Wert von etwa 0,3 M.-% je Versuch an.

Rütteldichte nach RUBACH

In [RUBACH, 1995] wird die Bestimmung der Trockenraumdichte unter Verwendung eines Proctorgeräts beschrieben. Dabei wird das Gesteinskörnungsgemisch durch das Fallgewicht schlagend verdichtet. Da im Gegensatz zu der Fallhöhe ein direkter Zusammenhang zwischen dem Fallgewicht und dem Grad der Kornzertrümmerung festgestellt wurde, gibt RUBACH die optimalen Versuchsparameter wie folgt an:

- Durchmesser des Rütteltopfs: 100 mm,
- Fallgewicht: 2,5 kg,
- Fallhöhe: 450 mm,
- Schlagzahl: 42.

Unter diesen Bedingungen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen der Dichte des Gesteinskörnungsgemischs im Proctorgerät und dem als Referenzprobe hergestellten Gussasphalt gleicher Gesteinszusammensetzung festgestellt.

Rütteldichte nach RADENBERG, SANDER

In [RADENBERG, SANDER, 2007] ist ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Rütteldichte beschrieben. Bei diesem wird das Gesteinskörnungsgemisch einer starken vibrierenden Druckkraft von kurzer Dauer ausgesetzt, da durch eine längere Rütteldauer keine Unterschiede in der Lagerungsdichte festgestellt werden konnten. Die empfohlenen Versuchsparameter lauten somit wie folgt:

- Durchmesser des Rütteltopfs: 100 mm,
- Auflast: 5 bar,
- Rütteldauer: 15 Sekunden.

Bild 4 ist beispielhaft die gezielte Minimierung des Hohlraumgehalts bei Gesteinskörnungsgemischen mit dem Verfahren nach [RADENBERG, SANDER, 2007] zu entnehmen. Dabei ist eine Veränderung des Hohlraumgehalts von 6 % bei Verwendung der selben Gesteinskörnungen in unterschiedlichen Zugabemengen dokumentiert.

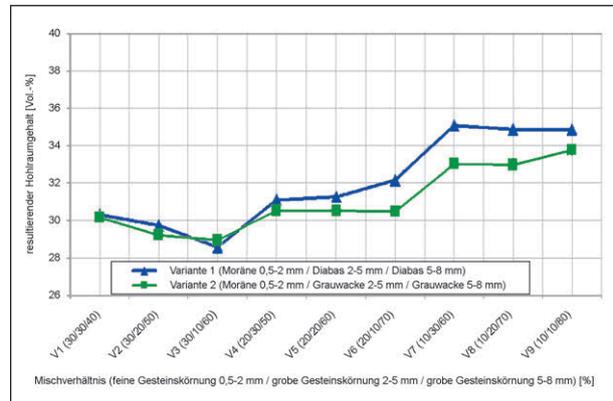


Bild 4: Mittlerer Hohlraumgehalt der Kröngemische 0/8 mit Diabas und Grauwacke [RADENBERG, SANDER, 2007]

3.3.2 Fließkoeffizient

Die Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen werden anhand des Fließkoeffizienten unterschieden. Dieser ist als die Zeit definiert, die eine vorgegebene Menge einer feinen Gesteinskörnung benötigt, um durch die genormte Öffnung der Versuchsvorrichtung zu rieseln [DIN EN 933, Teil 6, 2002].

3.3.3 Versteifende Wirkung des Füllers

Klassisch werden die versteifenden Eigenschaften anhand des Hohlraumgehalts nach RIGDEN [DIN EN 1097, Teil 4, 2008] und der Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel [DIN EN 13179, Teil 1, 2000] beurteilt. Dagegen wird die Bestimmung der spezifischen Oberfläche als nicht geeignetes Kriterium angesehen [SUSS et al., 1982].

Zugretardationsversuch

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung der Mörtel Eigenschaften ist die Bestimmung der Viskosität mit dem Zugretardationsversuch nach [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2010]. Dabei werden Prismen mit einem rechteckigen Prüfquerschnitt (25 x 40 mm) durch eine sprunghaft aufgebrachte statische Zugspannung in Längsrichtung belastet. Unter der Voraussetzung konstanter Zugspannung und Temperatur steigt die Dehnung nach ausreichender Versuchszeit nahezu linear an. In diesem Bereich wird die Zugviskosität der Probe als Quotient aus der aufgebrachten Spannung und der Dehnungsgeschwindigkeit berechnet.

Anhand der Mörtel Eigenschaften sollen direkte Rückschlüsse auf die Verformungsbeständigkeit von Gussasphaltproben möglich sein. In [SCHEL-

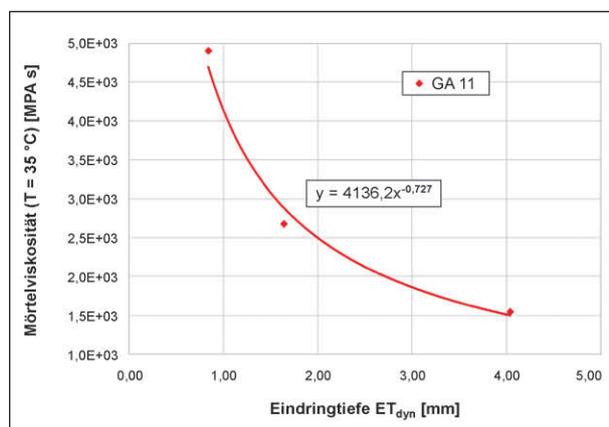


Bild 5: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Mörtelviskosität bei 35 °C nach [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2001]

LENBERG, SCHELLENBERG, 2001] ist die Korrelation zwischen der Mörtelviskosität bei 35 °C und der statischen Stempelleindringtiefe bei 50 °C entsprechend Bild 5 allerdings nur mit drei Punkten nachgewiesen worden.

Rheologisches Verhalten mittels DSR

In [ABBAS, 2004] und [EULITZ et al., 2004] wurde das Verhalten von Asphaltmörtel mit dem dynamischen Scher-Rheometer (DSR) untersucht.

Dabei werden die Kenngrößen komplexer Schermodul G^* und Phasenwinkel δ bestimmt. Der komplexe Schermodul gibt über das Verhältnis zwischen Spannung und resultierender Deformation ein Maß für die Steifigkeit der untersuchten Substanz an. Der Phasenwinkel, der anhand des zeitlichen Verlaufs der Spannung und Deformation berechnet wird, ist ein Maß für den Anteil der elastischen (reversiblen) und der viskosen (irreversiblen) Verformungsanteile. Dabei liegt bei einem Phasenwinkel von 0° eine rein elastische Substanz vor, während bei einem Phasenwinkel von 90° irreversibles Fließen auftritt. Bei allen Phasenwinkeln zwischen 0° und 90° sind die Deformationen sowohl elastisch als auch viskos [MEZGER, 2006].

In Bild 6 sind die typischen Funktionsverläufe des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkel eines nicht modifizierten Bitumens zwischen 0 und 150 °C dargestellt. Charakteristisch ist dabei der rapide Rückgang des komplexen Schermoduls bei Erwärmung des Bindemittels und die gleichzeitige Zunahme der irreversiblen zu Lasten der reversiblen Verformungsanteile (Erhöhung des Phasenwinkels).

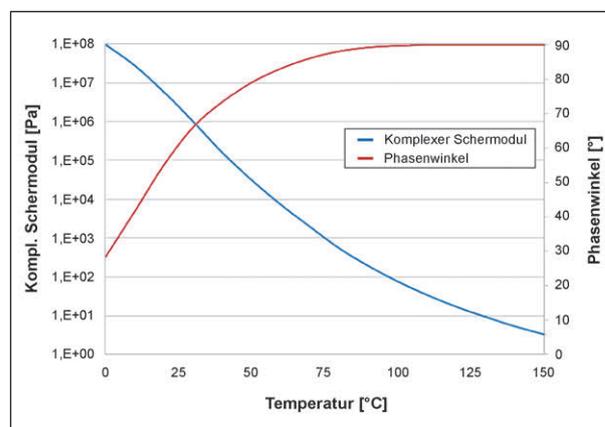


Bild 6: Typische Funktionsverläufe des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels bei reinem Bitumen

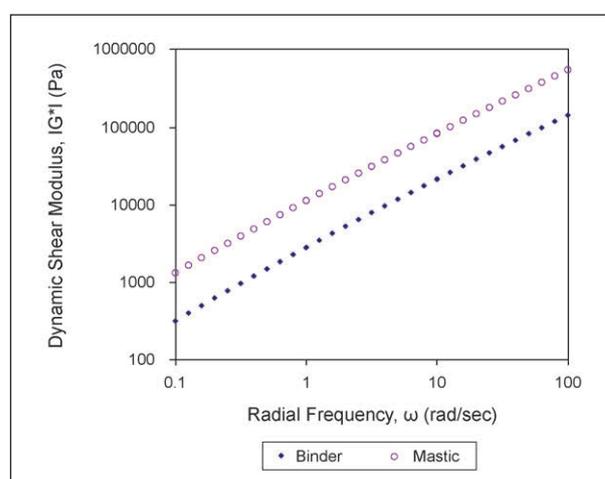


Bild 7: Auswirkungen eines Diabas-Füllers (30 Vol.-%) auf den komplexen Schermodul eines RFTO-gealterten Bitumens PG64-28 bei 50 °C [ABBAS, 2004]

Zur Herstellung der Asphaltmörtel verwendete ABBAS Füller mit einem Durchmesser kleiner 75 μm . Diese wurden mit verschiedenen Bitumen in unterschiedlichen Mischungsverhältnisse kombiniert. Der volumetrische Anteil des Füllers bei den analysierten Mörteln betrug dabei 30 Vol.-% (Bilder 7 und 8).

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Füller bei der gewählten Messtemperatur von 50 °C unabhängig von der Frequenz eine nahezu konstante, deutlich ausgeprägte Erhöhung des komplexen Schermoduls bewirken (Bild 7). Folglich wird die Steifigkeit durch die Zugabe des Füllers deutlich erhöht.

Bei demselben Versuch wurde zwischen den Phasenwinkeln des Bitumens und des Mörtels kein Unterschied festgestellt (Bild 8). Das Verhältnis zwischen elastischem und viskosem Verformungsanteil wird somit durch den Füller nicht beeinflusst.

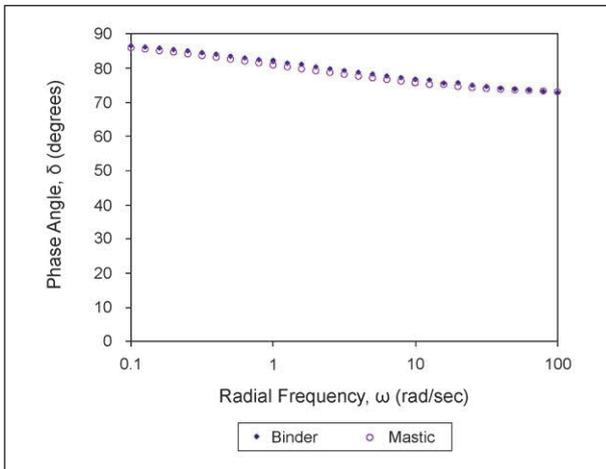


Bild 8: Auswirkungen eines Diabas-Füllers (30 Vol.-%) auf den Phasenwinkel eines RFTO-gealterten Bitumen PG64-28 bei 50 °C [ABBAS, 2004]

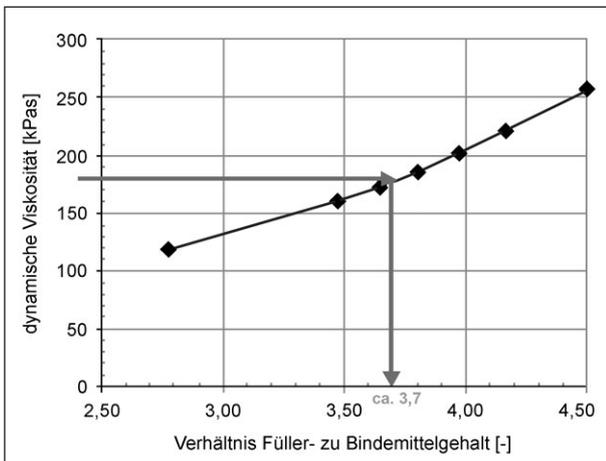


Bild 9: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit vom Verhältnis Füller zu Bitumen [EULITZ et al., 2004]

Im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung von Gussasphalt führten EULITZ et al., 2004 ebenfalls rheologische Untersuchungen am Asphaltmörtel mittels DSR durch. Da die Verformungsbeständigkeit untersucht werden sollte, wurde eine Prüftemperatur von 50 °C gewählt. Dabei wurden die Mischungsverhältnisse zwischen Füller und Bitumen in einem für den Gussasphalt üblichen Bereich variiert. Anhand der resultierenden dynamischen Viskosität kann das Mischungsverhältnis zwischen Füller und Bitumen demnach gemäß Bild 9 den jeweiligen Anforderungen (vorgegebene minimale Viskosität) angepasst werden.

Rheologisches Verhalten mittels BBR

Das Tieftemperaturverhalten von Asphaltmörtel wurde von [SPIEGL, 2008] mittels Bending-Beam-Rheometer (BBR) untersucht. Bei diesem Versuch

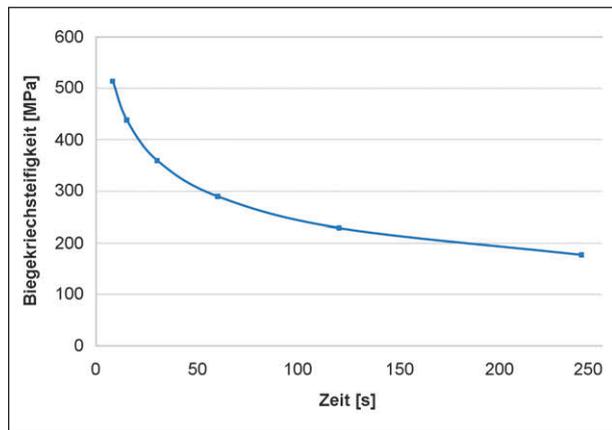


Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Biegekriechsteifigkeit

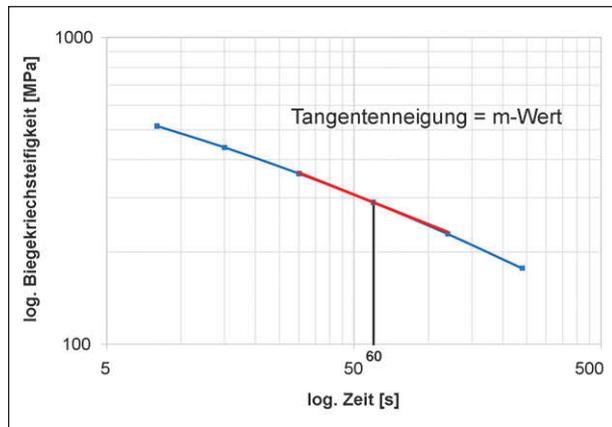


Bild 11: Grafische Bestimmung des m-Werts

werden gemäß [DIN EN 14771] Balken aus Bitumen – oder in diesem Fall Mörtel – einer statischen Drei-Punkt-Biegebelastung ausgesetzt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Biegung am Probenmittelpunkt unter einer konstanten Last wird die zeitabhängige Biegekriechsteifigkeit $S_{(t)}$ berechnet. Dabei sind die Abmessungen des Probekörpers und die Stützweite bekannt, während die nach [DIN EN 14771] vorgegebene Prüflast von 980 ± 50 mN und die Biegung des Probekörpers gemessen wird. Aus diesen Größen wird die zeitabhängige Biegekriechsteifigkeit berechnet. Der typische Funktionsverlauf der Biegekriechsteifigkeit über die Zeit ist in Bild 10 dargestellt.

Neben der Biegekriechsteifigkeit ist der m-Wert, der im doppellogarithmischen Maßstab die Abnahme der Steifigkeit gegen die Zeit wiedergibt, der zweite rheologische Kennwert (siehe Bild 11). Materialtechnisch ist der m-Wert als Maß für das Relaxationsvermögen der Probe anzusehen.

In seinen Untersuchungen variiert SPIEGL die Bitumensorte, die Gesteinsart, das Mischungsverhält-

nis zwischen Füller und Bitumen sowie die Prüftemperatur. Dabei zeigt sich, dass bei allen Füllertypen die Steifigkeit mit Erhöhung des Füllergehalts steigt, während die Relaxationsfähigkeit abnimmt. Der Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die Mörtel­eigenschaften nimmt bei weiche­ren Bindemitteln stärker zu als bei härteren. Dabei ist der Mörtel bei identischem Mischungsverhältnis bei härteren Bitumen stets steifer als bei weiche­ren. Die Gesteinsart wirkt sich dagegen bei drei von vier Füllern (Kalkstein, Granit und Kies-Magyer) nur geringfügig auf die Mörtel­eigenschaften aus. Einzig durch die Verwendung von Kalkhydrat entsteht ein weitaus steiferer und weniger relaxationsfähiger Mörtel.

3.4 Herstellung von Gussasphalt

Das Mischen von Gussasphalt geschieht in der Asphaltmischanlage in kurzer Zeit und in großen Chargen. Dabei werden die temperierten Ausgangsmaterialien mit großer mechanischer Kraft vermischt ohne den Gussasphalt dabei vollständig zu homogenisieren. Direkt im Anschluss folgt die Verladung in die Rührwerkskessel. Die Homogenisierung des Gussasphalts, die für die Verarbeitbarkeit und für eine gleichbleibend gute Qualität notwendig ist, erfolgt während des Transports in beheizten Rührwerkskesseln. In [ARBIT, 1994] wird dazu eine minimale Homogenisierungsdauer von zwei Stunden empfohlen.

Die Oberfläche des Gussasphalts, die mit Sauerstoff in Verbindung kommt, ist während des Misch- und des Homogenisierungsprozesses gering. Zudem ist laut [HUTSCHENREUTHER, WÖRNER, 1998] die Heizung während des Auslassens des Gussasphalts auf der Baustelle zu drosseln und die Rührgeschwindigkeit zur Reduzierung der Sauerstoffaufnahme zu verringern. Daher schreitet die oxydative Alterung des Bitumens bis zum Einbau des Gussasphalts nur in geringem Maße voran. Dennoch bestehen bezüglich der Dauer und der Temperatur während des Transportes in den Rührwerkskesseln Höchstgrenzen zur Minimierung der Bindemittelalterung bzw. -schädigung. So dürfen Gussasphalte unter Verwendung von Straßenbaubitumen maximal zwölf Stunden und unter Verwendung von polymermodifizierten Bitumen nur acht Stunden im Rührwerkskessel transportiert werden [ZTV Asphalt-StB, 2007]. Die Höchsttemperatur beträgt dabei 230 °C.

Das Mischen des Gussasphalts im Labor erfolgt gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 35, 2007]. Das Mischverfahren und die maximale Temperatur werden dabei vorgegeben. Durch ein kurzes Mischen im Labor kann jedoch kein Gussasphalt entstehen, der mit dem in der Mischanlage hergestellten und im Rührwerkskessel homogenisierten, vergleichbar ist. Daher wird in [TP Asphalt-StB, Teil 35, 2007] darauf verwiesen, dass die Mischzeiten bei Gussasphalt zur Gewährleistung einer ausreichenden Fließfähigkeit deutlich höher sind als bei Walzasphalt. Zudem wird darauf hingewiesen, dass die Homogenität visuell zu überprüfen ist. Durch längeres Mischen bei hohen Temperaturen schreitet jedoch aufgrund der großen Oberfläche des Gussasphalts im Labormischer die oxydative sowie die destillative Alterung des Bitumens schnell voran.

Konkrete Angaben für die Herstellung eines ausreichend homogenen Gussasphaltes im Labor liegen zurzeit nicht vor.

3.5 Überprüfung der Gussasphal­teigenschaften

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Herstellung eines standfesten Gussasphaltes bei möglichst geringer Einbautemperatur. Zur Überprüfung der dazu notwendigen Eigenschaften – Ver­haltensverhalten und Verformungsbeständigkeit – sind zum Teil Versuche und Verfahren notwendig, die bisher nur für wissenschaftliche Betrachtungen angewandt wurden.

3.5.1 Verarbeitbarkeit

Zur Bestimmung des Ver­haltens­verhaltens von Gussasphalt im Labor werden zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen unterschieden. Eine Möglichkeit ist die Beurteilung anhand des Fließvermögens des Gussasphaltes über sein Ausbreitmaß, während bei der anderen Möglichkeit der Verformungswiderstand gemessen wird.

Ausbreitmaß nach SIKINGER et al.

Die Verarbeitbarkeit der Gussasphaltproben wird bei diesem einfachen Verfahren anhand der Ausbreitung einer bezüglich ihrer Masse und Temperatur fest definierten Probe bestimmt. In [SIKINGER et al., 2001] wird dazu in Anlehnung an die [DIN 18555, Teil 2] auf einem Ausbreittisch (Hägermann Tisch)

nach [DIN 1060, Teil 3] das Ausbreitmaß des Gussasphalts bestimmt. Aufgrund der hohen Temperaturen wird die vorgesehene Glasplatte an diesem Tisch durch eine Kupferplatte ersetzt. Zur Versuchsdurchführung wird die mit einer Silikonwasseremulsion beschichtete Kupferplatte nach dem Abheben des zuvor darauf platzierten, mit Gussasphalt gefüllten Formzylinders 15 mal angehoben und wieder fallen gelassen. Dabei ist die Temperatur der Probe festzuhalten und das Ausbreitmaß zu messen. Über die Durchführung dieses Versuchs bei unterschiedlichen Temperaturen können Rückschlüsse auf das temperaturabhängige Verarbeitungsverhalten gezogen werden. Nachteil dieses Verfahrens ist die Schwierigkeit der exakten Temperierung des Gussasphalts und die Vielzahl der herzustellenden und zu untersuchenden Proben zur Beschreibung des Verhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen.

Ausbreitmaß nach EULITZ et al.

In [EULITZ et al., 2004] haben die Autoren den von SIKINGER et al. vorgestellten Versuch noch vereinfacht, indem sie eine bezüglich Masse und Temperatur fest definierte Gussasphaltprobe auf ein Blech gegeben haben und das Ausbreitverhalten beobachtet haben. Eine quantitative Beschreibung des Verarbeitungsverhaltens kann dabei jedoch nicht vorgenommen werden.

Rührwiderstand nach SPRINGER et al.

Zur Messung des Rührwiderstandes wird an einer Probe die Verarbeitbarkeit über das komplette für den Einbau von Gussasphalt relevanten Temperaturspektrum bestimmt. Für Gussasphaltestriche entwickelte die Deutsche Shell AG dazu das in [SPRINGER et al., 1995] vorgestellte Verfahren. Dabei wird eine Probe mit einem Volumen von 760 cm^3 fünf cm hoch in ein zylindrisches Messgefäß gegeben. Aufgrund der geringen Einfüllhöhe ist dieses Verfahren nur für Gussasphaltestriche mit einem Größtkorn von 5 mm geeignet.

Der Versuch startet bei einer Temperatur von $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese wird in der Folge in Intervallen von jeweils $10 \text{ }^\circ\text{C}$ bis auf $260 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht. Durch eine kontinuierliche Messung des zur Aufbringung einer konstanten Rührgeschwindigkeit von 17 Umdrehungen pro Minute notwendigen Momentes, ergibt sich der temperaturabhängige Rührwiderstand. Dieser Rührwiderstand wird als Maß für die Verarbeitbarkeit angesehen.

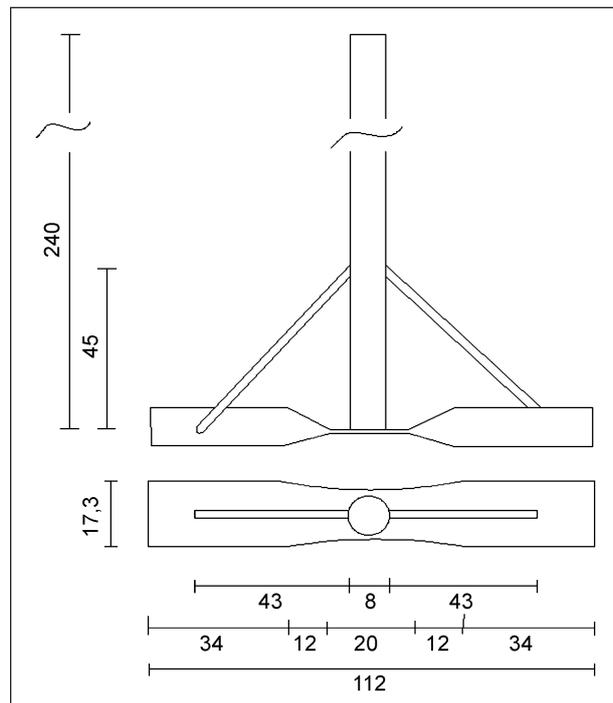


Bild 12: Flügelrührer [SPRINGER et al., 1995]

Neben der beabsichtigten Beschränkung auf Gussasphaltestriche mit einem Größtkorn von 5 mm wird in [KÖHLER et al., 2003] darauf hingewiesen, dass der Geräteaufbau mit dem in Bild 12 dargestellten Flügelrührer zur Ablagerung von Mischgutteilen führt. Dies verursacht eine ungleichmäßige thermische Beanspruchung des Probenmaterials.

Rührwiderstand nach KÖHLER et al.

In [KÖHLER et al., 2003] stellen die Autoren ein Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt vor, bei dem das mit 2.245 cm^3 größere Probenvolumen auch grobkörnigere Gussasphaltestriche als homogene Masse untersucht werden können. Zudem soll durch die in Bild 13 dargestellte Bauform des Rührers und eine höhere Rührgeschwindigkeit von 25 Umdrehungen pro Minute eine bessere und zudem dauerhafte Homogenisierung des Probenmaterials erzielt werden.

Da das von KÖHLER et al. beschriebene Verfahren primär der Erprobung von Additiven dient, ist das Mischen und Homogenisieren des Gussasphalts im Rührtopf Bestandteil des Versuchs. Nach der sukzessiven Zugabe des Bitumens und der Gesteinskörnungen folgt eine Homogenisierungsphase von etwa zehn Minuten Dauer. Währenddessen läuft der Rührer bereits und das Gemisch wird auf $250 \text{ }^\circ\text{C}$ temperiert. Im Anschluss an die Homogenisierung

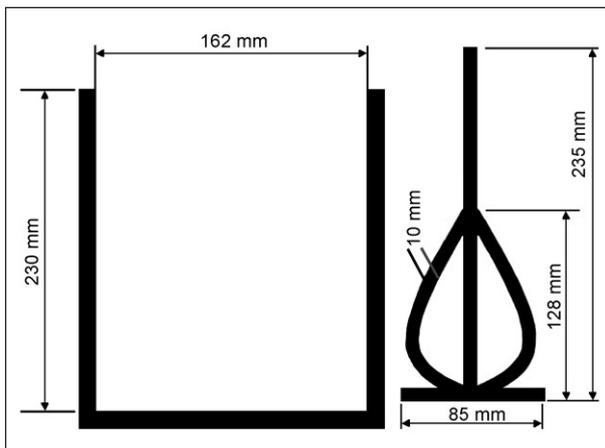


Bild 13: Skizze des Rührtopfs und des Rührers [M TA, 2006]

beginnt der Messvorgang mit einer Abkühlung von 250 °C auf 190 °C und der anschließenden Erwärmung auf die Ausgangstemperatur. Dieser Prüfzyklus wird mindestens dreimal wiederholt. Der Versuch ist bei guter Übereinstimmung zwischen dem vorletzten und dem letzten Prüfzyklus zu beenden, da in diesem Fall von einer ausreichenden Homogenisierung des Probenmaterials auszugehen ist.

Rührwiderstand gemäß M TA 2011

Die Untersuchung der Verarbeitbarkeit gemäß [M TA, Entwurf 2010] ist im Gegensatz zu dem von KÖHLER et al. beschriebenen Verfahren an vorher gemischten und homogenisierten Gussasphaltproben durchzuführen. Dadurch kann dieses Verfahren sowohl bei werksmäßig als auch bei labortechnisch gemischtem Gussasphalt angewendet werden.

Zu Versuchsbeginn werden 2.250 g des zuvor erwärmten Mischguts in den Rührtopf (Bild 14) gegeben und dort unter ständigem Rühren auf 250 °C erwärmt. Die vollständige Homogenisierung ist abgeschlossen, wenn sich das Rührwiderstandsmoment innerhalb von 5 Minuten um maximal 5 Ncm ändert. Im Anschluss daran wird das temperaturabhängige Widerstandsmoment während der Abkühlung von 250 auf 190 °C gemessen.

Um Entmischungen während der Versuche zu vermeiden, wurde der Rührer von KÖHLER et al. wie in Bild 14 dargestellt verändert. Der modifizierte Rührer besteht aus drei übereinander angeordneten Flügelpaaren. Die untere Flügelanordnung drückt durch die Stellung der Flügel das Mischgut nach oben, während durch die obere Flügelreihe das Untersuchungsmaterial nach unten gedrückt wird. Dadurch wird eine Gegenstrombewegung im Rührtopf

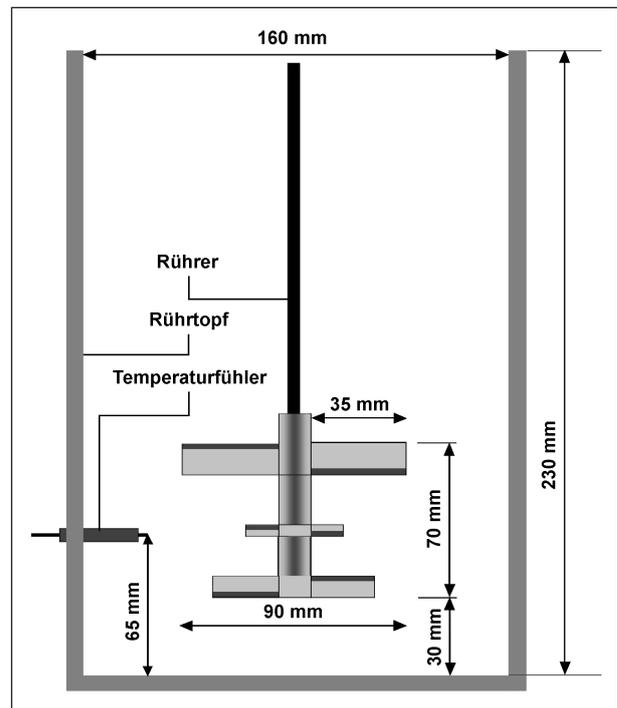


Bild 14: Schematische Darstellung des modifizierten Rührers [M TA, 2011]

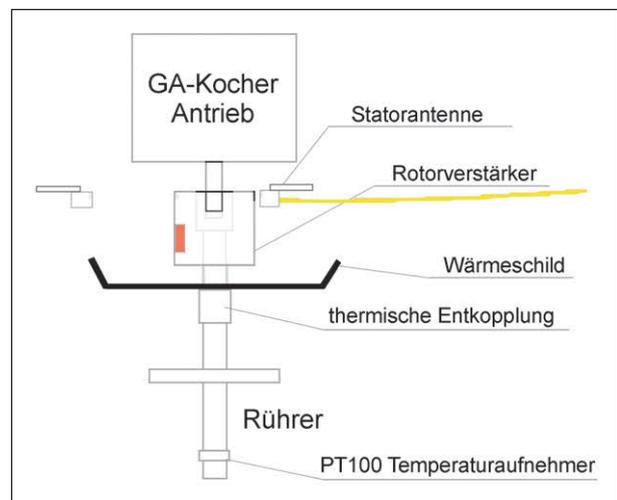


Bild 15: Verarbeitbarkeit des Gussasphalts – allgemeiner Messaufbau [SCHELLENBERG, 2009]

gewährleistet und eine Entmischung vermieden. Dieses Verfahren ist im Anhang 2 des [M TA, 2011] beschrieben.

Rührwiderstand nach SCHELLENBERG

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt wurde von SCHELLENBERG entwickelt. Hierbei werden etwa 10 kg des Gussasphalts in den Prüfstand gegeben (Bild 15). Die Bestimmung des Rührwiderstandsmo-

ments erfolgt bei einer Drehgeschwindigkeit von 13 Umdrehungen pro Minute bei drei maßgebenden Temperaturen: 180 °C, 210 °C und 240 °C [NÖSSLER, GOOS, 2009].

3.5.2 Verformungsbeständigkeit

Die quantitative Beurteilung des Verformungsverhaltens von Gussasphalt erfolgt in Deutschland anhand des statischen Stempeleindringversuchs nach [TP Asphalt-StB, Teil 20, 2007]. Neben den Nachteilen der wenig praxisgerechten statischen Belastung und der seitlichen Einspannung werden bei diesem Messverfahren eine geringe Differenzierbarkeit und relativ hohe Prüffehler erzielt. Daher ist dieses Verfahren gemäß [STEINAUER, SCHARNIGG, 2007] erst bei größeren Eindringtiefen zu einer sinnvollen Beurteilung der Gussasphalte einsetzbar. Zur Beurteilung hochstandfester Gussasphalte wird dagegen die nach [TL Asphalt-StB, 2007] bislang nur zur Erfahrungssammlung anzugebende dynamische Stempeleindringtiefe nach [TP Asphalt-StB, Teil 25A1, 2007] empfohlen.

Als Performance-Prüfung simuliert der dynamische Stempeleindringversuch die tatsächliche Belastung

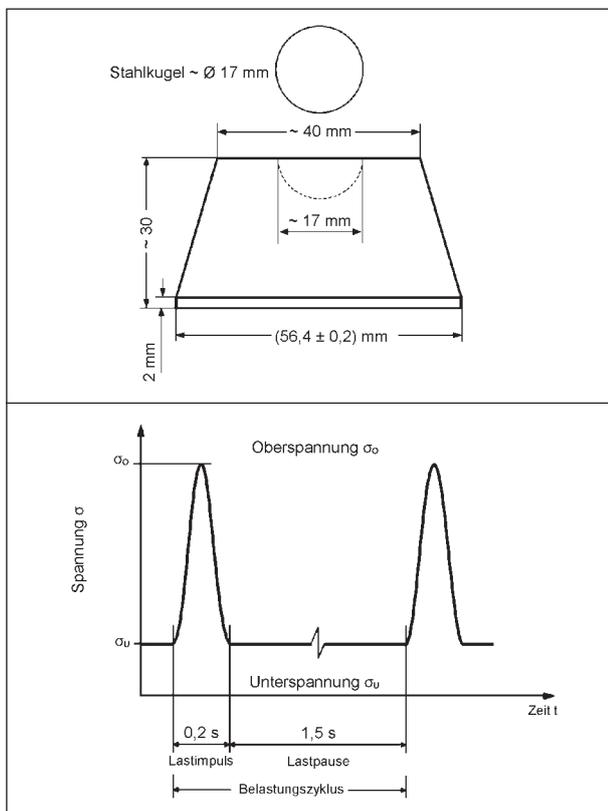


Bild 16: Darstellung des Laststempels und der Belastungsphase [TP Asphalt-StB, Teil 25, 2007]

des Gussasphalts wesentlich besser als der statische Stempeleindringversuch. Die dynamische Belastung wird dabei durch eine haversinenförmige, 0,2 Sekunden dauernde Belastung mit anschließender Belastungspause von 1,5 Sekunden erzeugt (Bild 16). Der im Vergleich zum statischen Stempeleindringversuch größere Probendurchmesser entspricht einer Einspannung ähnlich den Verhältnissen auf der Straße.

Zur Überprüfung der Aussagekraft der dynamischen Stempeleindringtiefe hat SCHELLENBERG die Spurrinntiefe auf Brückenbelägen mit unterschiedlich zusammengesetzten Gussasphalten erfasst und mit den an identischen Gussasphaltproben bestimmten Eindringtiefen verglichen. Gemäß Bild 17 ist mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,893 ein direkter Zusammenhang gegeben.

Bis zur normativen Bewertung der dynamischen Eindringtiefe geben die Richtwerte nach [SCHELLENBERG, EULITZ, 2000] Anhaltswerte zur Beurteilung des Gussasphalts (Tabelle 2).

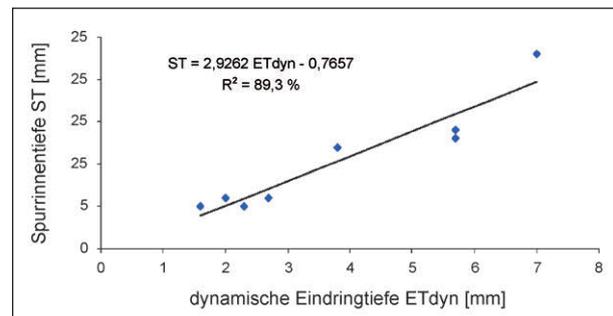


Bild 17: Zusammenhang zwischen der Spurrinntiefe von Brückenbelägen aus unterschiedlich zusammengesetzten Gussasphalten vom Typ GA 0/11 [SCHELLENBERG, 2009]

Kategorie	Beanspruchung durch		ET _{dyn} [mm]
	Verkehr	Klima/Lage	
1	Langsam rollender bis stehender Schwerverkehr (Stauraum, Steigung/Gefälle)	Extrem warme Sommer, lange direkte Sonneneinstrahlung, milde Winter	≤ 1,5
2	Rollender Verkehr auch mit hohem Anteil an Schwerverkehr	warme Sommer mit direkter Sonneneinstrahlung, milde Winter	≤ 2,5
3	Rollender Verkehr mit geringem Anteil an Schwerverkehr	mäßige Temperaturen, kurze Sonneneinstrahlung, kalte Winter, Höhenlage	≤ 5,0

Tab. 2: Richtwerte für die dynamischen Eindringtiefen nach [SCHELLENBERG, EULITZ, 2000]

4 Beschreibung der durchgeführten Versuche

4.1 Versuchsprogramm

Das Forschungsprojekt zur Temperaturabsenkung von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze soll Erkenntnisse liefern, die einen direkten Einfluss auf die Praxis der Gussasphalt Herstellung haben. Daher bilden praxiserprobte Gussasphalthe die Basis der Untersuchungen.

Nach der Beschaffung der Praxisproben, die gemäß Kapitel 3.1.3 nur noch unter Verwendung viskositätsverändernder Zusätze hergestellt werden, wurden diese im Labor des Lehrstuhls für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum analysiert. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Bestimmung der Verformungsbeständigkeit und des Verarbeitungsverhaltens.

In einem Zwischenschritt wurde die labortechnische Herstellung von Gussasphalt optimiert, um anhand der so hergestellten Proben verlässliche Rückschlüsse über die Auswirkungen der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen ziehen zu können.

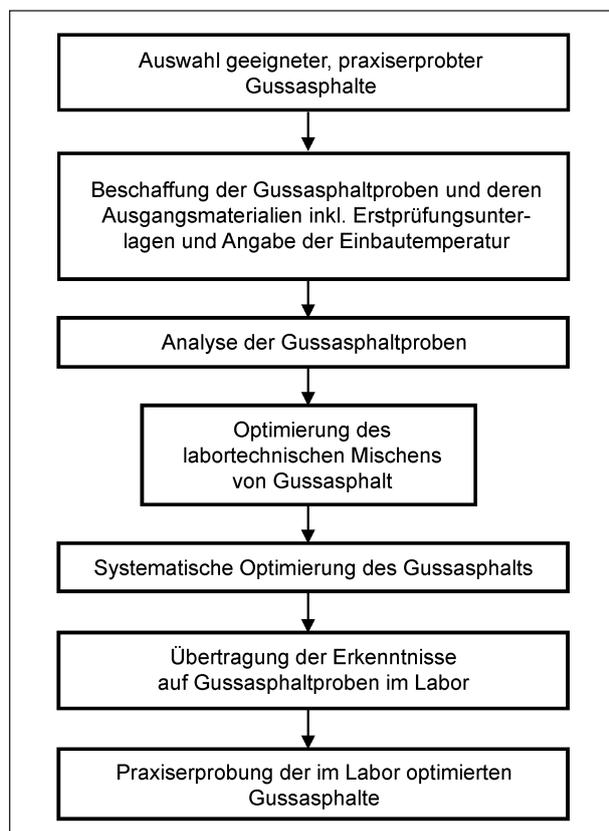


Bild 18: Ablaufschema des Untersuchungsprogramms

Zur systematischen Optimierung der Rezepturen wurden die Einflüsse der verschiedenen Materialkomponenten (Füller, feine und grobe Gesteinskörnung) auf den Gussasphalt untersucht.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden auf die Gussasphalthe übertragen. Dazu wurden die verschiedenen Materialkomponenten zielgerichtet variiert, um die Verarbeitbarkeit ohne Verlust der Verformungsbeständigkeit zu verbessern.

Die Gussasphaltproben, die durch die Veränderung der Zusammensetzung, auch bei Verzicht auf viskositätsverändernde Zusätze, die Möglichkeit zur Verarbeitung bei maximal 230 °C zulassen, wurden der Praxiserprobung zugeführt. Zur Kontrolle der Laborergebnisse wurden auf den Baustellen die notwendigen Einbautemperaturen bestimmt. Anhand der Messungen der dabei entstehenden Dämpfe und Aerosole wurden die Expositionen bei der Verarbeitung des Gussasphalts bei abgesenkten Temperaturen ohne viskositätsverändernde Zusätze bewertet.

In Bild 18 ist der beschriebene Versuchsablauf schematisch dargestellt.

4.2 Auswahl und Beschaffung praxiserprobter Gussasphalthe

Das Ziel dieses Forschungsprojektes besteht nicht darin, völlig neue Konzepte zur Herstellung von Gussasphalt zu entwickeln. Vielmehr sollen bewährte Rezepturen zielgerichtet optimiert werden. Daher bilden praxiserprobte Gussasphalthe, die unter Verwendung viskositätsverändernder Zusätze hergestellt wurden, die Basis des Forschungsprogramms. Dazu wurden Gussasphalthe für besondere Beanspruchungen (MA 5 S, MA 8 S und MA 11 S) von Mischwerken bezogen, die über langjährige Erfahrungen mit der Herstellung von Gussasphalt verfügen. Zur Schaffung einer breiten Basis (sowohl bezüglich der Zusammensetzung als auch des Know-how) wurden zu Beginn des Forschungsprojektes aus sieben deutschlandweit verteilten Standorten Gussasphaltproben bereitgestellt. Im Laufe des Forschungsprojektes wurde der Probenumfang um Gussasphalt-Proben von drei weiteren Asphaltmischwerken (in der folgenden Aufzählung mit „*“ gekennzeichnet) ergänzt, die gezielt zur Praxiserprobung aufgenommen wurden.

- Berlin,
- Bischofsheim,

- Bremen*,
- Dortmund,
- Duisburg,
- Hamburg,
- Köln,
- Neu Bamberg*,
- Oberhausen*,
- Oberursel.

Unabhängig von der Reihenfolge der zuvor aufgezählten Standorte werden den zu Beginn des Forschungsprojektes zur Verfügung stehenden Gussasphalten zur Vereinfachung Materialkürzel gemäß Tabelle 3 zugeordnet.

Alle Gussasphalte wurden nach dem Mischen zunächst in die Rührwerkskessel gefüllt. Nach einer ausreichenden Homogenisierung wurden die Proben entweder noch am Mischwerk oder auf der Baustelle entnommen. Zur umfassenden Analyse im Labor waren dazu Mengen von 30 bis 40 kg notwendig.

Gleichzeitig wurden an den Mischanlagen je Variante ca. 250 kg der zur Herstellung der Gussasphalte verwendeten Gesteinskörnungen entnommen. Die eingesetzten Bindemittel wurden in einigen Fällen

Mischwerk	Gussasphaltsorte	Kürzel
A	MA 5 S	A5
A	MA 8 S	A8
A	MA 11 S	A11
B	MA 8 S	B8
B	MA 11 S	B11
C	MA 8 S	C8
C	MA 11 S	C11
D	MA 11 S	D11
E	MA 5 S	E5
E	MA 8 S	E8
E	MA 11 S	E11
F	MA 11 S	F11
G	MA 5 S	G5
G	MA 8 S	G8
G	MA 11 S	G11

Tab. 3: Verwendete Basis-Gussasphalte inkl. zugeordnetem Materialkürzel

ebenfalls von den Mischwerksbetreibern zur Verfügung gestellt. Bei den Varianten, die unter Verwendung gebrauchsfertiger, viskositätsveränderter Bindemittel hergestellt wurden, wurden diese von den Bitumenlieferanten bereitgestellt.

Als zusätzliche Informationen wurden von den Mischwerksbetreibern die Erstprüfungsunterlagen und die minimalen Einbautemperaturen der bereitgestellten Gussasphaltvarianten übermittelt.

4.3 Untersuchung der Basis-Gussasphalte

Der Hauptanteil bei der Analyse der Basis-Gussasphalte war die Bestimmung des Verformungs- und Verarbeitungsverhaltens.

Zur Charakterisierung des Verarbeitungsverhaltens wurde bei allen Varianten eine Doppelbestimmung des Rührwiderstandsmomentes in Anlehnung an das in Kapitel 3.3.1 beschriebene Verfahren nach [M TA, 2011] durchgeführt. Die einzige Änderung betrifft den Bereich der Messtemperaturen. Da Gussasphalt nur noch bei maximal 230 °C eingebaut werden darf, wurde die Versuchstemperatur um 10 °C reduziert. Die Messungen beginnen somit bei 240 °C und enden bei 180 °C.

Das Verformungsverhalten wurde durch statische und dynamische Stempel Eindringversuchen nach [TP Asphalt-StB, Teil 20, 2007] bzw. [TP Asphalt-StB, Teil 25A1, 2007] analysiert.

Zusätzlich wurde zur exakten Bestimmung der Zusammensetzung der Gussasphalte die Korngrößenverteilung und der Bindemittelgehalt ermittelt.

4.4 Labortechnische Herstellung des Gussasphaltes

Die Herstellung von Gussasphalt in der Mischanlage inklusive der darauf folgenden Homogenisierung im Rührwerkskessel unterscheidet sich grundlegend von der Asphaltherstellung in den üblichen Labormischern. Da die Optimierung der Gussasphaltrezepturen jedoch an Labormischungen durchzuführen ist, waren die Produktionsbedingungen dahingehend zu verbessern, dass die Asphalteeigenschaften des labortechnisch gemischten Gussasphalts den Praxisproben entsprechen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde kein spezieller Gussasphalt-, sondern ein handelsüblicher Labormischer verwendet (Bild 19), sodass die aufgestellte Arbeitsanleitung und die Ergebnisse von einem Großteil der Asphaltlabore reproduzierbar sind.

Während der Vorversuche zur Entwicklung eines Mischverfahrens zur Herstellung von praxisgerechtem Gussasphalt mittels Labormischer wurden die Versuchsparameter in den folgenden fünf Schritten variiert.

1. Gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 35, 2007] wurden die Gesteinskörnungen auf 230 °C und das Bitumen auf 175 °C vorgewärmt. Die Gesteinskörnungen wurden in dem auf 230 °C temperierten Mischer vorgemischt, bevor das Bindemittel dazugegeben wurde. Nach einer Mischzeit von 30 Minuten bei konstanter Temperatur und mittlerer Rührgeschwindigkeit war der Asphalt hergestellt.
2. Gegenüber der ersten Variante wurde die Temperatur erhöht. Die Gesteinskörnungen wurden dabei ebenso wie der Mischer auf 250 °C temperiert, während das Bitumen auf 200 °C vorgewärmt wurde. Die übrigen Parameter blieben unverändert.
3. Bei der dritten Variante entsprachen die Temperaturen denen der Variante 1. Die Reihenfolge der Zugabe der Komponenten wurde jedoch geändert. Nach einem Vormischen der Komponenten Bitumen, Füller und feine Gesteinskörnung wurden die groben Gesteinskörnungen nach einer Mischzeit von 10 Minuten zugegeben. Während der gesamten Mischzeit von 30 Minuten wurde eine mittlere Rührgeschwindigkeit eingestellt. Des Weiteren wurde über einen Schlauch Stickstoff in den Mischer geleitet, um die oxydative Bitumenalterung zu minimieren.
4. Bei der vierten Variante wurde die Temperatur deutlich reduziert. Da Gussasphalt jedoch zur gleichmäßigen Verteilung seiner Komponenten und zur anschließenden Homogenisierung hohe Temperaturen bedarf, wurde bei einer niedrigen Temperatur von 180 °C begonnen, um diese während des Mischprozesses kontinuierlich auf maximal 210 °C zu erhöhen. Dadurch kann das Mischgut zunächst bei geringer thermischer Beanspruchung durchgemischt werden, bevor es bei höherer Temperatur und damit geringer Viskosität des Bindemittels homogenisiert wird.



Bild 19: Labormischer zur Herstellung des Gussasphalts

Vortemperierung: Bitumen 160 °C Gesteinskörnungen: 200 °C		
Drehzahl: 15 U/min	Grobe + feine Gesteinskörnungen + Bitumen	160 °C
	2 min mischen	
	50 % des Füllers zugeben	
	10 min mischen	
	25 % des Füllers zugeben	190 °C
	12 min mischen	
	25 % des Füllers zugeben	
	12 min mischen	
12 min mischen	190 °C	

Bild 20: Schematische Darstellung des optimierten Herstellungsprozesses von Gussasphalt

Während der Homogenisierungsphase wird die Rührgeschwindigkeit auf ihr Minimum reduziert. Der Sauerstoff im Mischer wurde erneut durch die Zuführung von Stickstoff verdrängt.

5. Die fünfte Variante wurde ebenfalls unter Zuführung von Stickstoff gemischt. Dabei wurde der Gussasphalt bei einer geringen Temperatur von 200 °C zunächst mit lediglich 50 M.-% des Füllers gemischt. Nach einer augenscheinlich guten Durchmischung wurde die Restmenge des Füllers sukzessive ergänzt.

Der anhand der Erkenntnisse aus den Vorversuchen optimierte Mischprozess ist in Bild 20 schematisch dargestellt. Nach dieser Anleitung wurden alle weiteren Gussasphalte im Rahmen dieses Forschungsprojektes gemischt.

Bei dem optimierten Mischprozess werden die Gesteinskörnungen vor Beginn des Mischens auf

200 °C und das Bitumen auf 160 °C vorgewärmt. Die Temperatur des Labormischers beträgt zu Beginn 160 °C. Bei einer während des gesamten Vorgangs konstant geringen Drehgeschwindigkeit von 15 U/min werden zu Beginn nur die groben und feinen Gesteinskörnungen mit dem Bitumen gemischt. Nach zwei Minuten werden über einen Trichter 50 M.-% des Füllers dazugegeben. Nach einer Mischzeit von 10 Minuten bei 160 °C werden diesem Gemisch weitere 25 M.-% des Füllers zugegeben. Danach wird die Temperatur aufgrund der zunehmenden Versteifung durch die Zugabe des Füllers innerhalb von 24 Minuten kontinuierlich bis auf 190 °C erhöht. In dieser Phase wird das Mischgut zunächst 12 Minuten gerührt, danach die letzten 25 M.-% des Füllers ergänzt und erneut 12 Minuten gerührt. Nach Erreichen der maximalen Temperatur von 190 °C wird der Gussasphalt zur Homogenisierung weitere 12 Minuten gemischt. Während des gesamten Prozesses wird der Sauerstoff in der Mischtrommel über eine externe Stickstoffzufuhr verdrängt.

4.5 Auswahl und Untersuchung der verschiedenen Komponenten zur systematischen Optimierung

Zur systematischen Optimierung des Gussasphalts sind die Einflüsse seiner einzelnen Komponenten zu untersuchen. Da die nachgewiesene positive Wirkung viskositätsverändernder Zusätze auf das Verarbeitungsverhalten nicht Bestandteil des Forschungsprojektes war, stehen die Einflüsse unterschiedlicher Bindemittel nur im Hintergrund des Untersuchungsprogramms. Dagegen wurden die Ein-

flüsse der verschiedenen Gesteinskörnungen (Füller, feine und grobe Gesteinskörnung) gemäß Bild 21 einzeln, so wie in Kombination untereinander oder mit dem Bitumen untersucht.

4.5.1 Auswahl und Untersuchung der Bitumen

Zur Unterscheidung der Eigenschaften und vor allem zur Herstellung der Asphaltmörtel wurden zwei Basisbitumen ausgewählt: die Straßenbaubitumen 20/30 und 30/45.

Zur Analyse der Basisbitumen wurden bei allen Varianten die physikalischen Bindemitteluntersuchungen zur Bestimmung der Nadelpenetration nach [DIN EN 1426, 2007] und des Erweichungspunktes Ring und Kugel gemäß [DIN EN 1427, 2007] durchgeführt. Zudem wurden die rheologischen Kennwerte ermittelt. Mit dem Dynamischen Scher-Rheometer (DSR) wurden die komplexen Schermoduln und die Phasenwinkel nach [DIN EN 14770, 2006] bestimmt, während mittels Bending-Beam-Rheometer (BBR) die Biegekreuchsteifigkeit und der m-Wert gemäß [DIN EN 14771, 2005] ermittelt wurden.

Untersuchungen mittels BBR

Mittels BBR wurden die rheologischen Eigenschaften bei tiefen Temperaturen (bei den Basisbitumen -16 °C) untersucht. Dabei wird das zuvor erwärmte Bindemittel zur Probenvorbereitung in eine Metallform gegossen. Nach der Abkühlung wird der Bindemittelbalken mit den Abmessungen 127,0 mm/12,7 mm/6,4 mm entsprechend [DIN EN 14771, 2005] für die Dauer von 60 Minuten in der Prüflös-

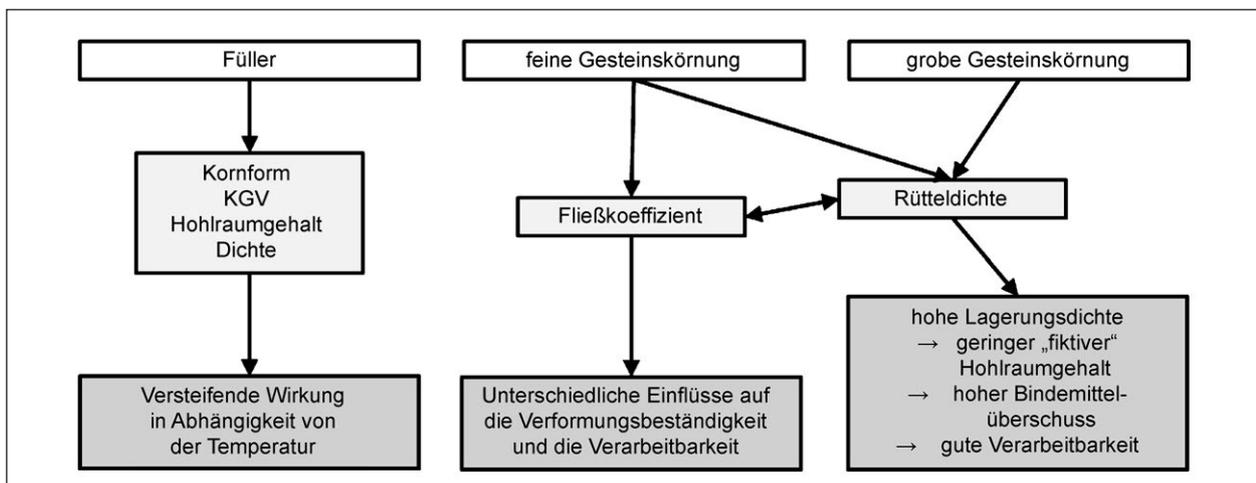


Bild 21: Darstellung der Ansätze zur systematischen Optimierung

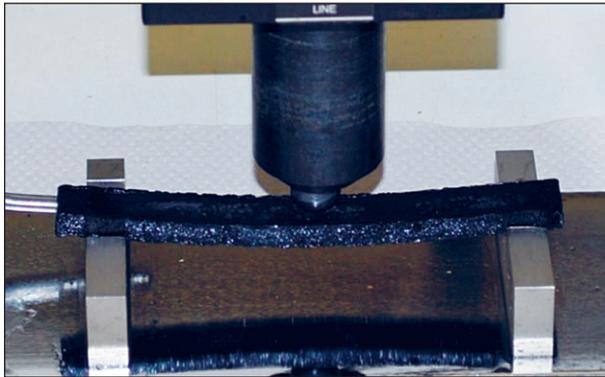


Bild 22: Belastung des Balkens im BBR

sigkeit (Ethanol) des BBR auf die Messtemperatur temperiert. In diesem Zustand wird der Balken gemäß Bild 22 einer statischen Drei-Punkt-Biegebelastung ausgesetzt. Während der 240 Sekunden dauernden Belastung werden die Kraft und die Biegung gemessen, um daraus die in Kapitel 3.3.3 definierten rheologischen Kennwerte Biegekriechsteifigkeit und m -Wert zu berechnen.

Untersuchungen mittels DSR

Das rheologische Materialverhalten bei höheren Temperaturen wurde mit dem DSR (Bild 23) untersucht.

Aufgrund der nicht immer einheitlichen Prüfbedingungen werden die gewählten Parameter im Folgenden kurz zusammengefasst:

Die Versuche wurden mit einer oszillierenden, weggesteuerten Belastung durchgeführt. Als Messgeometrie wurden zwei Platte-Platte-Systeme mit einem Durchmesser von 8 bzw. 25 mm (siehe Bild 23) bei einem vertikalen Plattenabstand von 1 mm verwendet. Bei Messtemperaturen zwischen 0 und 40 °C wurden die Proben wegen der hohen Bindemittelsteifigkeit mit der kleinen (8 mm Durchmesser) Messgeometrie untersucht. Aufgrund der niedrigeren Viskosität zwischen 40 und 150 °C wurden neue Proben mit der großen (25 mm Durchmesser) Messgeometrie analysiert. Der empfohlene Temperaturbereich nach [DIN EN 14770, 2006] von 25 bis 85 °C wurde damit zur umfassenderen Analyse deutlich überschritten. Dabei ist gemäß [DIN EN 14770, 2006] eine Erweiterung des Temperaturspektrums wie in diesem Fall auf 0 bis 150 °C ausdrücklich gestattet. Die gewählte Prüffrequenz von 1,59 Hz, die gemäß [MEZGER, 1995] die Fahrgeschwindigkeit auf einer Straße von 80 km/h simulieren soll, entspricht den Empfehlungen zahlreicher



Bild 23: Dynamisches Scher-Rheometer (DSR) inkl. Messgeometrie

Regelwerke wie [TL Bitumen-StB 2007] oder [AASHTO TP 5, 1993]. Zum Sicherstellen, dass die Untersuchungen in dem in [DIN EN 14770, 2006] zahlenmäßig nicht exakt definierten linear viskoelastischen (LVE-)Bereich der Bindemittel durchgeführt werden, wurden vorbereitende Amplitudentests durchgeführt. Dabei wurde gemäß [DIN EN 14770, 2006] durch eine kontinuierliche Erhöhung der weggesteuert aufgebrachtene Deformationen die material- und temperaturabhängige Grenze des LVE-Bereichs bestimmt. Diese gilt als überschritten, sobald der komplexe Schermodul um mehr als 5 % von seinem Mittelwert abweicht.

4.5.2 Auswahl und Untersuchung der Füller

Um ein breites Spektrum an Gesteinsarten abzudecken, wurden mit Kalkstein, Diabas, Quarz und Schiefer vier sehr unterschiedliche Füller untersucht. Von dem im Gussasphalt am häufigsten verwendeten Kalksteinmehl (vgl. Kapitel 3.2) wurden zur vertieften Analyse Füller aus fünf über Deutschland verteilten Gewinnungsstätten verwendet, die mit Ausnahme des Kalkstein aus Bruchsal im Gussasphalt häufig und regelmäßig zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sollten noch zwei Kalksteinfüller aus einem Steinbruch analysiert werden, die sich bezüglich der Korngrößenverteilung signifikant voneinander unterscheiden.

Mit künstlich aufbereiteten Gesteinsmehlen aus Kalkhydrat und Microsilica wurde die Auswahl um zwei extrem feinkörnige Füller komplettiert, die im Gussasphalt im Allgemeinen nicht verwendet werden. Während das Kalkhydrat aufgrund seiner in Kapitel 3.2 ausgeführten positiven Eigenschaften im Walzasphalt bereits erfolgreich erprobt wurde,

Gesteinsart	Herkunft	Kürzel
Diabas	Halbeswig	DH
Kalkhydrat	Flandersbach	Ka
Kalkstein	Bernburg	KBe
Kalkstein	Bruchsal	KBr
Kalkstein	Flandersbach	KF
Kalkstein	Hehlen	KH
Kalkstein	Medenbach	KM
Microsilica		Mi
Quarz	Haltern	QH
Schiefer	Bacharach	SB

Tab. 4: Verwendete Füller

sollte mit dem Microsilica der Einfluss der Zugabe eines extrem feinen, kugelförmigen Zusatzes auf die Mörtel Eigenschaften untersucht werden.

In Tabelle 4 sind alle verwendeten Gesteinsfüller inklusive der zur Vereinfachung eingeführten Materialkürzel zusammengefasst.

An den Gesteinsfüllern wurden die folgenden granulometrischen Eigenschaften bestimmt:

- Hohlraumgehalt nach RIGDEN entsprechend [DIN EN 1097, Teil 4, 2008],
- Korngrößenverteilung mittels Laser-Partikel-Sizer,
- Rohdichte nach [DIN EN 1097, Teil 7, 2008].

4.5.3 Auswahl, Herstellung und Untersuchung der Asphaltmörtel

Auswahl der Asphaltmörtel

Zur Überprüfung ihrer grundsätzlichen Eignung wurden zunächst alle zuvor granulometrisch untersuchten Füller zur Herstellung von Asphaltmörtel mit dem Straßenbaubitumen 30/45 gemischt. Das Schiefermehl wurde zusätzlich in Kombination mit dem Füller KF eingesetzt. Dabei wurde ein Mischungsverhältnis von 25 M.-% SB und 75 M.-% KF gewählt. Das Kalkhydrat und das Microsilica wurden dagegen aufgrund ihrer stark versteifenden Wirkung nur in Kombination mit dem Kalksteinmehl aus Flandersbach (KF) eingesetzt. Nach anfänglichen Versuchen in einem Mischungsverhältnis von 25 M.-% des Kalkhydrats bzw. Microsilicas und 75 M.-% des Füllers KF wurde das gravimetrische Mischungsverhältnis zwischen dem Kalkhydrat bzw.

	Gussasphalt-sorte	Kürzel
DH		DH30
Kbe	KBe20	KBe30
KBr		KBr30
KF	KF20	KF30
KH	KH20	KH30
KM	KM20	KM30
Qu		QH30
SB	SB20	SB30
25 % SB + 75 % KF	SK20	SK30
10 % Ka + 90 % KF	KK20	KK30
10 % Mi + 90 % MS	MK20	MK30

Tab. 5: Verwendete Mörtel

dem Microsilica und dem Füller KF auf 10/90 festgelegt.

Entsprechend der grundsätzlichen Eignung wurden die Füller ebenfalls in Verbindung mit den anderen Bitumen untersucht. Dazu sind in Tabelle 5 alle untersuchten Mörtelvarianten einschließlich der zugeordneten Materialkürzel aufgeführt.

Mischungsverhältnis und Herstellung des Asphaltmörtels

Das Mischungsverhältnis zwischen Bitumen und Füller wurde so gewählt, dass es dem Verhältnis dieser Bestandteile im Gussasphalt nach [TL Asphalt-StB, 2007] entspricht. Dazu wurden gemäß Tabelle 6 die möglichen Zusammensetzungen der Sorten MA 5 S und MA 11 S berücksichtigt. Da in [TL Asphalt-StB, 2007] jedoch nur Mindestwerte für die Bindemittelgehalte und keine Maxima angegeben sind, wurde ein Höchstwert von 9 M.-% angenommen. Die Grenzwerte der Massenanteile des Füllers, die in den TL Asphalt-StB 07 auf das Gesteinskörnungsgemisch bezogen sind, wurden auf das Gesamtgemisch umgerechnet und ins Verhältnis zu den Bindemittelmengen gesetzt. Als extreme gravimetrische Mischungsverhältnisse zwischen Füller und Bitumen wurden dabei als füllerreichste Möglichkeit 81,0/19,0 und als bitumenreichste 66,7/33,3 ermittelt.

Das zweite Kriterium bei der Wahl des Mischungsverhältnisses war die Möglichkeit zur Herstellung eines homogenen Asphaltmörtels. Da stark versteifende Füller bei Vorversuchen in einem Mischungsverhältnis von 80/20 einen derart hohen Bindemit-

	Bezeichnung		MA 11 S	MA 5 S
Mischvorgaben für Gussasphalt [TL Asphalt-StB; 2007]	Grenzwerte für Fülleranteil im Gesteinskörnungsgemisch [M.-%]		20 – 28	24 – 28
	Mindest-Bindemittelgehalt im gesamten Gemisch [M.-%]		6,8	7,0
Bestimmung minimaler und maximaler Füller/Bitumen-Verhältnisse aus den Vorgaben der [TL Asphalt-StB; 2007]	Füllerreicher Mörtel	Max. F/B aus [TL Asphalt-StB; 2007]	28,0/6,8	32,0/7,0
		Umrechnung der Fülleranteile auf das gesamte Gemisch	26,2/6,8	29,9/7,0
		Umrechnung in ein prozentuales Mischungsverhältnis	79,4/20,6	81,0/19,0
	Bitumenreicher Mörtel	Min. F/B mit angenommenem max. Bitumenanteil	20,0/9,0	24,0/9,0
		Umrechnung der Fülleranteile auf das gesamte Gemisch	18,0/9,0	21,6/9,0
		Umrechnung in ein prozentuales Mischungsverhältnis	66,7/33,3	70,6/29,4
Gewählte Mischungsverhältnisse			70/30	

Tab. 6: Wahl des Mischungsverhältnisses des Asphaltmörtels



Bild 24: Asphaltmörtel mit zu geringem Bindemittelgehalt bei einem stark versteifenden Füller

telbedarf aufwiesen, dass die Herstellung eines homogenen Mörtels unmöglich war (Bild 24), wurde zur Vereinheitlichung des Versuchsprogramms bei allen Füllern ein Mischungsverhältnis von 70/30 gewählt.

Zur Herstellung des Mörtels wurde der Fülleranteil mit einem Korndurchmesser über 0,125 mm abgeseibt. Der verbleibende Füller wurde je Mischung abgewogen und zusammen mit dem ebenfalls abgewogenen Bitumen auf 180 °C erwärmt. In diesem Zustand wurde der Füller bei ständiger Temperierung sukzessive von Hand in das Bitumen eingeührt.

Untersuchung der Mörtel Eigenschaften

An den Asphaltmörteln wurden die folgenden, in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Kennwerte bestimmt:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel, [DIN EN 1427, 2007],
- Formänderungsarbeit bzw. Verlauf der Kraftduktilitätsfunktion, [DIN EN 13589, 2008] und [DIN EN 13703, 2003],
- Biegekiechsteifigkeit und m-Wert mittels BBR, [DIN EN 14771, 2005],
- Komplexer Schermodul und Phasenwinkel mittels DSR, [DIN EN 14770, 2006].

Abweichend zu den Ausführungen in Kapitel 4.5.1 wurden die Untersuchungen mit dem BBR bei -5 °C durchgeführt. Darüber hinaus erforderte die Herstellung der Probekörper aus Asphaltmörtel höhere Temperaturen. Erst ab Temperaturen von ca. 180 °C waren normgerechte, quaderförmige Probekörper zu gießen. Bei niedrigeren Temperaturen und bei zu stark versteifenden Füllern verhinderte die höhere Viskosität des Mörtels die komplette Verteilung des Materials in der Form. Dadurch entstanden Balken mit ungleichmäßigen, geometrisch nicht zu identifizierenden und damit zur Berechnung der Kennwerte unbrauchbare Formen (Bild 25).

Die Untersuchungen des Mörtels mit dem DSR unterschieden sich von den in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Analysen der Bitumen durch eine Erweiterung des Temperaturspektrums. Während die minimale Temperatur von 0 °C identisch gewählt wurde, ist das Maximum zur Bewertung des Verarbeitungsverhaltens von Gussasphalt auf 200 °C erweitert

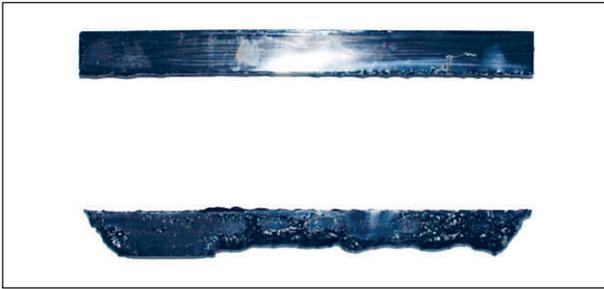


Bild 25: Normgerechter (oben) und aufgrund der zu hohen Bindemittelsteifigkeit während der Probenherstellung ungeeigneter (unten) Balken zur Überprüfung der Kälteeigenschaften mittels BBR

worden. Zwischen 0 °C und 60 °C (mit der 8-mm-Messgeometrie) betragen die Prüfintervalle je 10 °C, während sie oberhalb davon (mit der 25-mm-Messgeometrie) zur Reduzierung der thermischen Alterung bei hohen Temperaturen auf 20 °C erhöht wurden.

Der Plattenabstand wurde ebenfalls auf 1 mm festgesetzt um Entmischungen zu reduzieren. Die Vorgaben von [MEZGER, 1996], wonach der Abstand mindestens dem Vierfachen des größten Partikels entsprechen soll, wurde somit bei einem maximalen Korndurchmesser von 0,125 mm entsprochen.

Übertragung der Mörtel- auf die Gussasphalteigenschaften

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Mörtel- auf die Gussasphalteigenschaften wurden Gussasphaltproben mit unterschiedlichen Gesteinsfüllern hergestellt. Die Zusammensetzung dieser Gemische entsprach – abgesehen von den jeweiligen Füllern – der praxiserprobten Basis-Variante A11. Die dabei verwendeten Füller waren die Varianten KBe, KF, SB, SK und KK.

Während die Zugabemenge der reinen Kalksteinfüller der ursprünglichen Rezeptur entsprachen (26 M.-%), wurde das Schiefermehl zusätzlich mit geringeren Mengen von 17 M.-% und 12 M.-% zugegeben. Die Zugabemenge der gemischten Füller betragen dagegen 20 (SK) bzw. 17 M.-% (KK). Die bislang untersuchten Varianten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

An diesen Gussasphalten wurden mit der Bestimmung der Rührwiderstandsmomente und der statischen Stempel Eindringtiefe sowohl das Verarbeitungs-, als auch das Verformungsverhalten untersucht.

Bezeichnung	Füller	Zugabemenge
A11 _{F1}	KBe	26,0 M.-%
A11 _{F2}	KF	26,0 M.-%
A11 _{F3}	SB	26,0 M.-%
A11 _{F4}	SB	17,0 M.-%
A11 _{F5}	SB	12,0 M.-%
A11 _{F6}	75 M.-% KF + 25 M.-% SB	20,0 M.-%
A11 _{F7}	90 M.-% KF + 10 M.-% SB	17,0 M.-%

Tab. 7: Füllierzugabe der Gussasphalte

4.5.4 Untersuchungen der feinen Gesteinskörnungen

Der Einfluss der feinen Gesteinskörnungen auf die Gussasphalteeigenschaften wurde auf Basis mehrerer, teils gebrochener, teils rundkörniger Materialien untersucht. Dazu wurden die zu Beginn des Forschungsvorhabens von den Mischwerken bereitgestellten feinen Gesteinskörnungen der Basis-Gussasphalte verwendet. Ergänzend wurde eine gebrochene Körnung mit einem sehr hohen Fließwiderstand untersucht.

Die verwendeten feinen Gesteinskörnungen, unterteilt nach Gesteinsart, dem liefernden Mischwerk und der Gewinnungsstätte sind einschließlich deren jeweils zugeordneten Materialkürzeln in Tabelle 8 aufgelistet.

Neben den Untersuchungen der Eigenschaften und der Einflüsse auf den Gussasphalt der in Tabelle 8 aufgelisteten Baustoffe wurden auch die Gemische aus unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen untersucht.

Zur Beschreibung der feinen Gesteinskörnungen wurden deren Fließkoeffizienten nach [DIN EN 933] bestimmt. Dies wurde sowohl bei den einzelnen Fraktionen als auch bei den Gemischen aus unterschiedlichen Gesteinen durchgeführt.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Fließkoeffizienten wurden an Gussasphaltemischungen untersucht, die mit Ausnahme der feinen Gesteinskörnungen identisch zusammengesetzt waren. Die Zusammensetzung entsprach dabei der praxiserprobten Basis-Variante A11. In Tabelle 9 sind die untersuchten feinen Gesteinskörnungen der hergestellten Gussasphalte aufgelistet.

Gesteinsart	Mischwerk	Herkunft	Kürzel
Natursand	Dortmund	Kamp-Lintfort	ND
Diabas	Dortmund	Halbeswig	DD
Natursand	Bischofsheim	Hessenaue	NBi
Granit	Bischofsheim	Sonderbach	GBi
Natursand	Köln	Kerpen-Wess.-Brühl	NK
Diabas	Köln	Blasbach	DK
Natursand	Hamburg	Hamburg	NH
Anorthosit	Hamburg	Immerstein	AH
Natursand	Berlin	Hartmannsdorf	NBe
Grauwacke	Berlin	Koschenberg	GBe
Grauwacke	-	Gummersbach	GG

Tab. 8: Verwendete feine Gesteinskörnungen I

Bezeichnung	Feine Gesteinskörnung
A11 _{fGk1}	100 M.-% NH
A11 _{fGk2}	100 M.-% AH
A11 _{fGk3}	100 M.-% GBe
A11 _{fGk4}	100 M.-% GG
A11 _{fGk5}	50 M.-% NH + 50 M.-% GBe
A11 _{fGk6}	50 M.-% NH + 50 M.-% GG
A11 _{fGk7}	50 M.-% ND + 50 M.-% DD
A11 _{fGk8}	50 M.-% ND + 50 M.-% GG

Tab. 9: Feine Gesteinskörnungen der Gussasphalte

Die Bewertung der Gussasphalteigenschaften wurde sowohl anhand des Verarbeitungs-(Rührwiderstand) als auch anhand des Verformungsverhaltens (statischer Stempel Eindringversuch) vorgenommen.

4.5.5 Untersuchungen der groben Gesteinskörnungen

Die Entstehung von Hohlräumen im Gesteinskörnungsgemisch, die eine Erhöhung des Bindemittelbedarfs zur Folge haben, wurde mit dem Rüttelversuch nach [RADENBERG, SANDER, 2007] bestimmt. Dabei wird der Proctortopf (Durchmesser 100 mm; Höhe 170 mm) zur Probenvorbereitung mit dem zuvor homogenisierten Gesteinskörnungsgemisch bis zu einer Höhe von 14 cm gefüllt. Der gefüllte Proctortopf wird gemäß Bild 26 auf dem Rütteltisch eingespannt. Über den Laststempel wird zur Verdichtung eine vertikale Druckspannung auf die Probe aufgebracht. Die Verdichtung erfolgt nach folgenden Bedingungen:

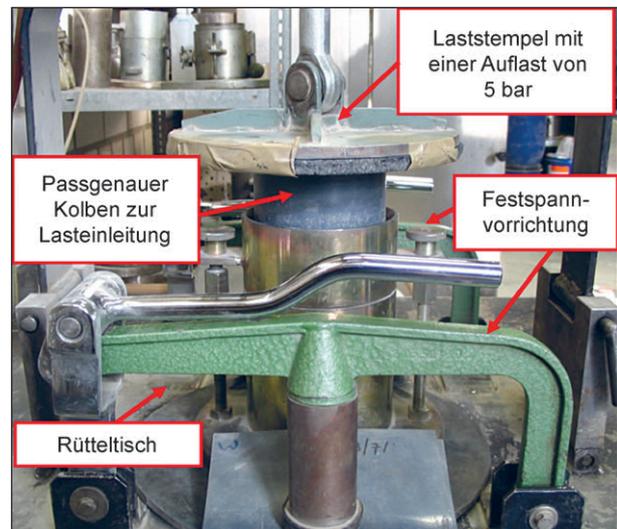


Bild 26: Rütteltisch des Straßenbaulabors der Ruhr-Universität Bochum

- Rütteldauer: 15 Sekunden,
- Auflast: 5 bar,
- Rüttelamplitude: 4 mm,
- Rüttelfrequenz: 50 Hz.

Das Verfahren wurde in der beschriebenen Ausführung bislang noch nicht für Gussasphaltuntersuchungen angewendet. Daher wurden Vorversuche mit unterschiedlichen Korngrößenbereichen durchgeführt. Anhand der resultierenden Ergebnisse wurde der Korngrößenbereich festgelegt, durch dessen Untersuchung der Bindemittelüberschuss des Gussasphalts bestmöglich beschrieben werden kann. Als Probenumfang wurden folgende Gesteinskörnungsgemische eingesetzt:

- Die in den Basis-Gussasphalten verwendeten feinen und groben Gesteinskörnungen wurden in den durch die Erstprüfungen gegebenen Rezepturen zusammengestellt und untersucht. Dazu wurden die Varianten A5, A8, A11, B8, B11, C8, C11 und F11 verwendet.
- Aus den feinen und groben Gesteinskörnungen der Gussasphaltvariante A11 wurde der Anteil der Gesteinskörnung kleiner 0,5 mm abgesiebt. Mit diesen, von den Feianteilen befreiten Gesteinskörnungsgemischen wurden die in Tabelle 10 aufgeführten vier Variationen untersucht:
- Ausschließlich die groben Gesteinskörnungen der Variante A11 werden in zwei unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht. Die Korngrößenverteilungen dieser Gemische wei-

Bezeichnung	A11 _{gGk1}	A11 _{gGk2}	A11 _{gGk3}	A11 _{gGk4}
Kornfraktion	Anteil [M.-%]			
8/11	24,3	24,3	24,3	40,5
5/8	20,3	20,3	20,3	13,5
2/5	25,7	25,7	25,7	16,2
0/2 (Diabas)	0,0	29,8	14,9	14,9
0/2 (Natursand)	29,8	0	14,9	14,9

Tab. 10: Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs zur Bestimmung der Rütteldichte (mit feinen Gesteinskörnungen)

Bezeichnung	A11 _{gGk5}	A11 _{gGk6}
Kornfraktion	Anteil [M.-%]	
8/11	34,6	57,7
5/8	28,8	19,2
2/5	36,5	23,1

Tab. 11: Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs zur Bestimmung der Rütteldichte (ohne feinen Gesteinskörnungen)

chen trotz jeweiliger Einhaltung der Grenzwerte der [TL ASPHALT-STB, 2007] deutlich voneinander ab (Tabelle 11).

Nach der Bestimmung eines optimalen Korngrößenbereichs werden an systematisch variierten Gesteinskörnungen (beispielsweise nach Gesteinsart, Fließkoeffizient oder Korngrößenverteilung) die Rütteldichten bestimmt. Durch die Berechnung der Hohlraumgehalte können die Einflüsse der Variation der unterschiedlichen Parameter bestimmt werden, um darüber Rückschlüsse auf den Bindemittelüberschuss und damit auf die Verarbeitbarkeit zu ziehen.

4.6 Übertragung der systematischen Optimierungsmaßnahmen auf die Basis-Gussasphalte

Zu Beginn der Optimierung der Zusammensetzungen wurden im Labor Gussasphalte hergestellt und untersucht, die sich von den Praxisproben nur durch den Verzicht des viskositätsverändernden Zusatzes unterscheiden.

Aufbauend auf den Rezepturen der praxiserprobten Gussasphalte wurden die Erkenntnisse, die bei den systematischen Variationen der verschiedenen Komponenten gemäß Kapitel 4.5 gewonnen wur-



Bild 27: Maschineller Gussasphalteinbau

den, auf die Praxisproben übertragen. Dazu waren zunächst die verschiedenen Komponenten der Gussasphalte einzeln zu variieren, um die Übertragbarkeit der „theoretisch“ an den verschiedenen Komponenten gewonnenen Erkenntnisse auf den Gussasphalt zu überprüfen.

Die im Rahmen der systematischen Optimierung gewonnenen Erkenntnisse, die bei der Analyse der Gussasphalte bestätigt wurden, wurden auf die praxiserprobten Gussasphalte übertragen. Dazu waren die entsprechenden Komponenten gezielt zu verändern. Diese Gussasphalte wurden bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit (Rührwiderstand) und ihrer Verformungsbeständigkeit (statischer und dynamischer Stempelleindringversuch) im Labor untersucht. Die Varianten, die sich dabei bewährten, sollten der Praxiserprobung zugeführt werden.

4.7 Praxiserprobung

Zur Praxiserprobung wurden elf Varianten ausgewählt, deren Laborergebnisse auf eine gute Verarbeitbarkeit und Verformungsbeständigkeit schließen lassen.

Während der Baumaßnahmen wurden die notwendigen Einbautemperaturen ermittelt. Zudem wurden von der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) Expositionsmessungen durchgeführt. Anhand dieser wurde die Arbeitsplatzbelastung aus Dämpfen und Aerosolen überprüft (Bild 27).

5 Versuchsergebnisse

5.1 Kennwerte der Basis-Gussasphalte

5.1.1 Zusammensetzung der Basis-Gussasphalte

Die Zusammensetzungen der Basis-Gussasphalte waren bereits vorab durch die Angaben in den Erstprüfungen bekannt. Eine Überprüfung dieser Werte im Labor des Lehrstuhls für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum diente der Feststellung möglicher Materialschwankungen und -veränderungen während der Asphaltherstellung. Beeinflussungen durch die Extraktion sind dabei jedoch unvermeidlich. Die gegebenen Soll- und die ermittelten Ist-Werte sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Ermittelt wurden die Korngrößenverteilungen, die Bindemittelgehalte und die Erweichungspunkte RuK. Die Anteile der feinen Gesteinskörnungen mit einem Fließkoeffizienten E_{CS35} wurden ausschließlich den Erstprüfungsunterlagen entnommen. Diese entsprachen in den meisten Fällen noch dem in den Erstprüfungen angegebenen Anteil des Brechsands

an der feinen Gesteinskörnung. Zur besseren Charakterisierung der feinen Gesteinskörnungen der Basis-Gussasphalte wurden zudem noch deren Fließkoeffizienten bestimmt (siehe Kapitel 5.4.4).

Entsprechend der aktuellen Praxis zur Verarbeitung von Gussasphalt wurden ausschließlich Bindemittel mit viskositätsverändernden Zusätzen verwendet. In drei Mischanlagen wurde dazu dem Straßenbaubitumen ein Additiv zugegeben, während in den anderen Mischanlagen gebrauchsfertige, viskositätsveränderte Bindemittel eingesetzt wurden. In sieben Mischanlagen werden ausschließlich Frischbindemittel eingesetzt, während bei zwei Varianten 15 M.-% Asphaltgranulat und das damit anfallende, bereits gealterte Bitumen verwendet wird.

5.1.2 Verarbeitbarkeit der Gussasphalte

Zur Analyse des Verarbeitungsverhaltens wurden die Rührwiderstandsmomente der Basis-Gussasphalte zwischen 180 °C und 240 °C gemessen. Die Ergebnisse, die in allen Fällen als arithmetisches Mittel von Doppelbestimmungen mit guter Präzision berechnet wurden, sind in Tabelle 13 zusammenge-

Gussasphalt variante	Bindemittel						Gesteinskörnung								
	Anteil				EP RuK		Anteil Füller		Anteil feine Gesteins- körnung		Anteil grobe Gesteins- körnung		Anteil Größtkorn		Anteil feiner Gesteinskörnung mit E_{CS35}
	[M.-%]		[Vol.-%]		[°C]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]		[M.-%]
	ist	soll	ist	soll	ist	soll	ist	soll	ist	soll	ist	soll	ist	soll	soll
A5	8,0	7,8	19,6	19,1	84,7	84,0	25,3	25,0	25,6	33,2	49,1	41,8	49,1	41,8	50,0
G5	8,5	7,5	21,2	18,7	-	80,0	22,1	25,1	36,3	34,7	41,6	40,2	41,6	40,2	100,0
D5	-	8,0	-	18,6	-	75,0	-	28,7	-	27,3	-	44,0	-	44,0	33,3
A8	7,6	7,5	18,8	18,5	96,9	84,0	23,7	24,1	25,8	30,9	50,5	45,0	23,5	21,3	50,0
B8	7,1	7,1	17,8	17,8	84,0	78,0	26,8	25,9	25,5	24,9	47,7	49,2	25,2	24,0	73,0
E8	7,7	7,6	19,1	18,9	77,5	78,5	24,4	26,0	22,6	26,0	53,0	48,0	23,1	21,0	33,3
C8	7,0	6,7	17,7	17,1	82,0	83,0	21,8	23,1	30,2	32,2	48,0	44,7	19,6	19,4	66,7
G8	-	7,3	-	18,4	-	80,0	-	23,4	-	29,6	-	47,0	-	22,7	100,0
A11	7,4	7,2	18,3	17,9	89,6	84,0	26,0	23,7	24,8	24,4	49,2	51,9	12,9	16,5	50,0
B11	6,7	6,5	16,9	16,4	83,2	78,0	25,9	25,6	24,0	22,8	50,1	51,6	19,2	20,6	70,6
C11	6,8	6,5	17,1	16,5	-	83,0	23,8	21,1	25,5	28,4	50,7	50,5	15,2	19,4	50,0
D11	7,8	6,6	19,4	16,4	77,8	84,5	23,5	23,2	26,0	24,8	50,5	52,0	14,8	20,0	64,0
E11	7,4	7,5	18,4	18,6	82,1	78,5	22,8	25,3	22,0	24,5	55,2	50,0	25,2	18,5	37,5
F11	7,6	7,2	18,3	17,4	-	75,0	24,2	22,9	27,9	27,1	47,9	50,0	16,9	18,6	38,5
G11	-	7,0	-	17,9	-	75,0	-	23,8	-	23,4	-	52,8	-	18,2	66,7

Tab. 12: Zusammensetzung der Basis-Gussasphalte

		Temperatur [°C]						
		180	190	200	210	220	230	240
Gussasphalt-Variante	A5	102	83	68	59	52	48	46
	G5	212	178	141	103	79	64	59
	A8	111	89	75	65	56	51	48
	B8	371	322	286	240	181	157	158
	C8	217	174	138	112	104	95	89
	E8	239	176	131	106	77	66	64
	G8	-	188	140	100	74	60	51
	A11	199	143	107	81	66	59	57
	B11	351	314	277	232	185	141	140
	C11	271	225	162	122	97	86	84
	D11	140	111	93	86	77	70	61
	E11	212	167	140	121	84	67	65
	F11	255	225	180	135	99	78	83
G11	155	118	98	78	70	64	63	
A11*	168	121	97	69	55	46	46	

Tab. 13: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente

fasst. In gleicher Weise sind die Rührwiderstandsmomente der mittels Labormischer hergestellten Probe A11* angegeben, deren Zusammensetzung der Probe A11 entspricht.

5.1.3 Verformungsbeständigkeit der Basis-Gussasphalte

Die statischen Stempel Eindringversuche wurden gemäß [TP Asphalt-StB 2007, Teil 20] durchgeführt. Sofern die Präzision nicht den Vorgaben des Teils 20 der TP Asphalt-StB 07 entsprachen, wurde eine weitere Probe untersucht. Die Präzision wurde dann gemäß [Teil 0, TP Asphalt-StB, 2007] für drei Proben bestimmt. Die daraus resultierenden Mittelwerte sind in den Bildern 28 und 29 als Funktion der Zeit dargestellt. Dabei sind in Bild 28 die bislang untersuchten Gussasphalte MA 5 S und MA 8 S zusammengefasst, während in Bild 29 die Funktionsverläufe der MA 11 S-Varianten abgebildet sind.

Die dynamische Stempel Eindringtiefe der Basis-Gussasphalte wurden gemäß [TP Asphalt-StB 2007, Teil 25 A1] bestimmt.

In den Bildern 30 (MA 5S und MA 8S) und 31 (MA 11S) sind die Funktionsverläufe der gemittelten dynamischen Eindringtiefen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl dargestellt.

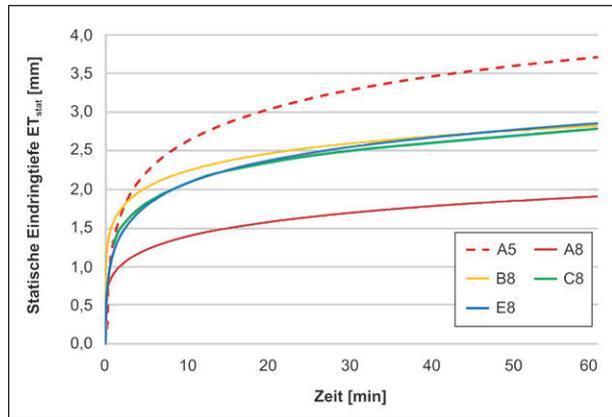


Bild 28: Statische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A5, A8, B8, C8, E8

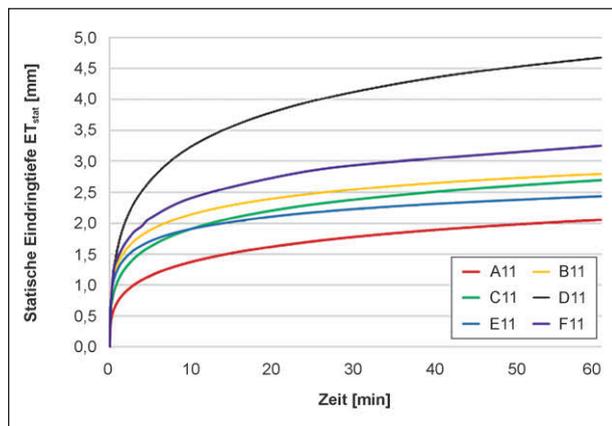


Bild 29: Statische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A11, B11, C11, D11, E11, F11

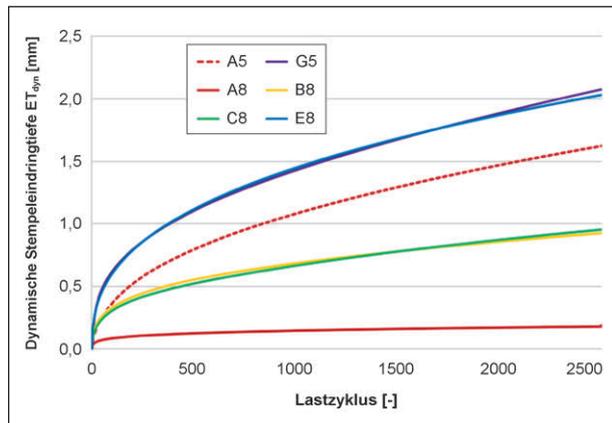


Bild 30: Dynamische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A5, G5, A8, B8, C8, E8

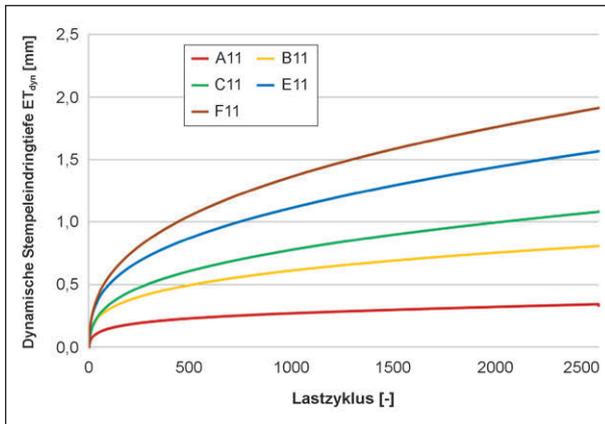


Bild 31: Dynamische Stempelindringtiefe der Gussasphaltproben A11, B11, C11, E11, F11

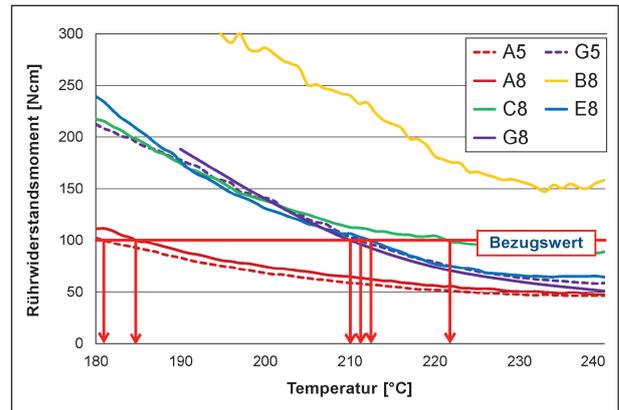


Bild 32: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Proben A5, G5, A8, B8, C8, E8, G8

5.2 Bestimmung des maximalen Rührwiderstandsmomentes zum Einbau von Gussasphalt

Eine quantitative Bewertung des Verarbeitungsverhaltens anhand der Rührwiderstandsmomente war bislang aufgrund des geringen Erfahrungshintergrundes nicht möglich. Die vor Beginn des Forschungsprojektes durchgeführten Versuche deuten jedoch darauf hin, dass Gussasphalt unterhalb eines Rührwiderstandsmomentes von 100 Ncm in der Praxis gut zu verarbeiten ist. Dieser Bezugswert wurde durch einen Vergleich der gemessenen Rührwiderstände mit den Praxiserfahrungen der verarbeitenden Baufirmen bzw. Mischwerke überprüft.

Gemäß den Bildern 32 und 33 wurden zunächst die Temperaturen bestimmt, bei denen die Rührwiderstandsmomente (bei der Höchsttemperatur von 240 °C beginnend) den Bezugswert von 100 Ncm übersteigen.

Die anhand des Bezugswertes ermittelten minimalen Verarbeitungstemperaturen sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Ergänzt wird diese Auflistung um die tatsächlichen minimalen Einbautemperaturen. Diese Werte beruhen teilweise auf den Erfahrungen der Mischwerksbetreiber, während in anderen Fällen die Verarbeitungstemperaturen auf den Baustellen gemessen wurden.

Die Rührwiderstandsmomente der Varianten B8 und B11 betragen selbst bei 240 °C deutlich mehr als 100 Ncm. Die ermittelten minimalen Einbautemperaturen (> 240 °C) weichen damit deutlich von den Praxiserfahrungen (220 °C) mit diesen Gussasphalten ab. Bei den übrigen neun Varianten stim-

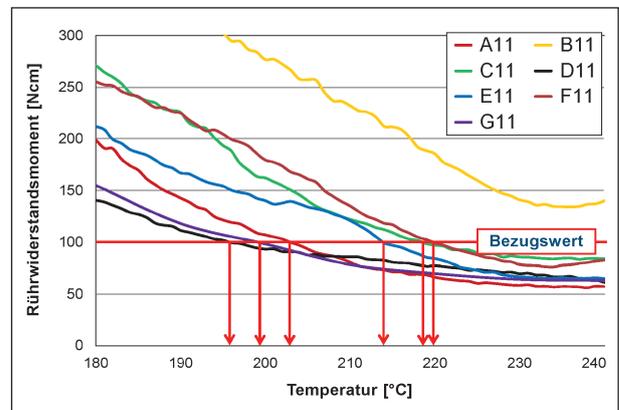


Bild 33: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Proben A11, B11, C11, D11, E11, F11, G11

Gussasphalt Variante	Minimale Einbautemperatur	
	Rührwiderstandsmessung [°C]	Herstellerangaben [°C]
A5	182	< 200
G5	211	210
A8	185	< 200
B8	> 240	220
C8	223	220
E8	212	210
G8	212	210
A11	203	200
B11	> 240	220
C11	218	220
D11	196	< 200
E11	214	210
F11	220	220
G11	200	200

Tab. 14: Minimale Einbautemperatur der Gussasphaltproben gemäß Rührwiderstandsmessung und laut Herstellerangaben

men die Einschätzungen des Verarbeitungsverhaltens anhand der Rührversuche sehr gut mit den Praxiserfahrungen überein. Bei Vernachlässigung der beiden bis dahin unerklärlich widerstandsfähigen Varianten B8 und B11 kann der Bezugswert von 100 Ncm somit als Indikator für ein gutes Verarbeitungsverhalten bestätigt werden.

5.3 Optimierung des labortechnischen Herstellens von Gussasphalt

Die in Kapitel 4.4 beschriebenen Vorversuche zur Herstellung von Gussasphalt mittels Labormischer zeigen, dass die Art des Mischens trotz identischer Zusammensetzung des Gussasphalts dessen Eigenschaften entscheidend beeinflusst.

Bei der ersten Mischvariante, die nach den Vorgaben des Teils 35 der TP Asphalt-StB 07 hergestellt wurde, entstand kein fließfähiger Gussasphalt. Daher lieferte der in Bild 34 dokumentierte Rührversuch keine auswertbaren Ergebnisse.

Bei der zweiten Variante wurde die Mischtemperatur um 20 °C erhöht. Durch die damit verbundene Reduzierung der Bindemittelviskosität sollte die Durchmischung verbessert werden. Der bei 250 °C hergestellte Gussasphalt war jedoch völlig „trocken“ und subjektiv noch schlechter zu verarbeiten. Möglicherweise beschleunigt eine Erhöhung der Mischtemperatur die Alterung des Bitumens derart, dass die resultierende Verhärtung des Bindemittels die Verarbeitbarkeit deutlich verschlechtert. Daher sind die Mischtemperaturen möglichst gering zu wählen.

Eine Veränderung der Reihenfolge der Materialzugabe und vor allem die Zugabe von Stickstoff führte bei der dritten Variante zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit. So entstand ein sehr zäher, im Gegensatz zu den ersten beiden Varianten jedoch fließfähiger Gussasphalt. Folglich verringert die Verdrängung des Sauerstoffs durch den Stickstoff die oxydative Bindemittelalterung deutlich.

Um die Erkenntnis weiter zu vertiefen, dass eine Reduzierung der Temperatur und damit der Bindemittelalterung eine deutliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit bewirkt, wurden die Varianten 4 und 5 erprobt. Um trotz geringer Mischtemperatur eine ausreichende Durchmischung und Homogenisierung sicherzustellen, wurde dabei die Temperatur während des Mischens gesteigert (Variante 4) bzw. die Reihenfolge der Materialzugabe variiert (Variante 5).



Bild 34: Rührversuch bei einem nicht fließfähigen Gussasphalt

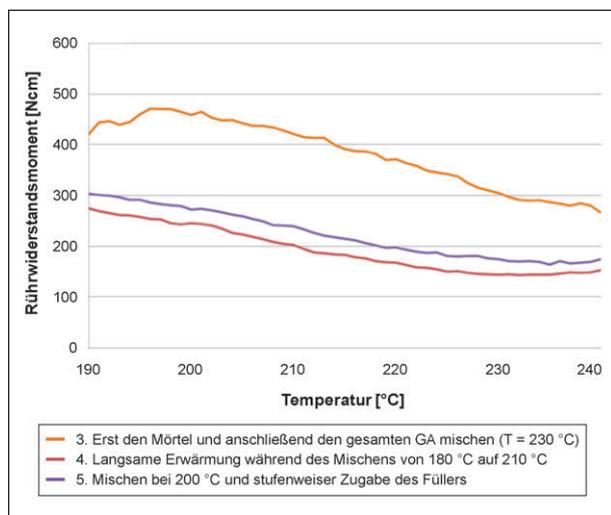


Bild 35: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente unterschiedliche hergestellten Gussasphalten gleicher Rezeptur

te 5). Durch diese Maßnahmen wurden die Rührwiderstandsmomente gemäß Bild 35 deutliche reduziert. Folglich ist trotz der temperaturbedingt hohen Bindemittelviskosität eine gute Durchmischung und Homogenisierung zu erzielen.

Aufgrund der positiven Erfahrungen wurden die vorgenannten Ansätze kombiniert. Dabei wird zur Minimierung der thermischen Alterung die Mischtemperatur reduziert und der Sauerstoff durch die Zugabe von Stickstoff verdrängt. Durch eine Steigerung der Temperatur während des Mischens und eine sukzessive Zugabe des Füllers wird eine gute Durchmischung und Homogenisierung gewährleistet. Dieser optimierte Prozess ist in Bild 20 in Kapitel 4.4 zusammengefasst.

Die Vergleichbarkeit des im Labormischer hergestellten Gussasphalts mit den Praxisproben wurde

bislang an einem Gussasphalt überprüft. Dazu wurde die Variante A11 mit den selben Gesteinskörnungen und Bitumen in der an den Praxisproben ermittelten Zusammensetzung nach dem Schema auf Bild 20 in Kapitel 4.4 nachgemischt.

Die Funktionsverläufe der temperaturabhängigen Rührwiderstandsmomente der Proben A11 und A11* weisen eine geringe parallele Verschiebung zueinander auf (Bild 36). Das im Mittel um etwa 15 Ncm geringere Rührwiderstandsmoment des im Labor hergestellten Gussasphalts A11* zeigt, dass dieser sehr gut gemischt und homogenisiert ist. Bei der untersuchten Variante ist die Verarbeitbarkeit der nachgemischten Probe sogar besser als die der Praxisprobe.

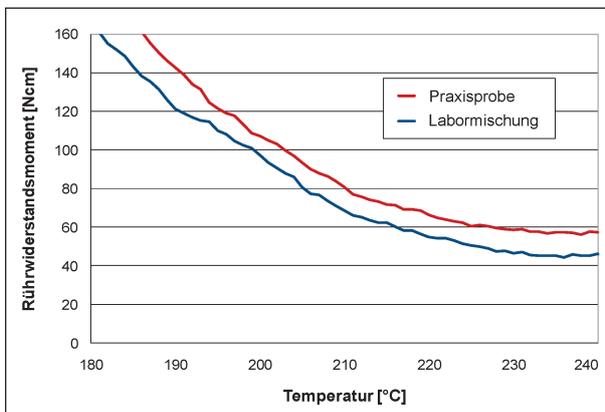


Bild 36: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Proben A11 und A11*

Da die Abweichung die erfahrungsgemäße Wiederholpräzision nur geringfügig überschreitet, ist dieses Mischverfahren für die Herstellung von Gussasphalt im Labormischer geeignet. Durch weitere Untersuchungen muss die Eignung des Herstellungsprozesses nach dem Schema in Bild 20 noch für Gussasphalte mit höheren Verarbeitungswiderständen nachgewiesen werden.

5.4 Ergebnisse der systematischen Optimierungsansätze

5.4.1 Granulometrische Kennwerte der Füller

Mittels Laser-Partikel-Sizer wurden die Korngrößenverteilungen der verwendeten Füller ermittelt. Die resultierenden Mittelwerte sind in Tabelle A1 des Anhangs zusammengefasst. Die Verläufe der Korngrößenverteilungslinien sind in Bild 37 dargestellt.

Die Rohdichten wurden nach [DIN EN 1097-7, 2008] ermittelt. Die Mittelwerte sind für die zehn untersuchten Füller bzw. Zusätze in Bild 38 zusammengefasst.

Die Hohlraumgehalte der Füller wurden nach [DIN EN 1097-4, 2008] bestimmt. Deren Mittelwerte sind in Bild 39 dargestellt.

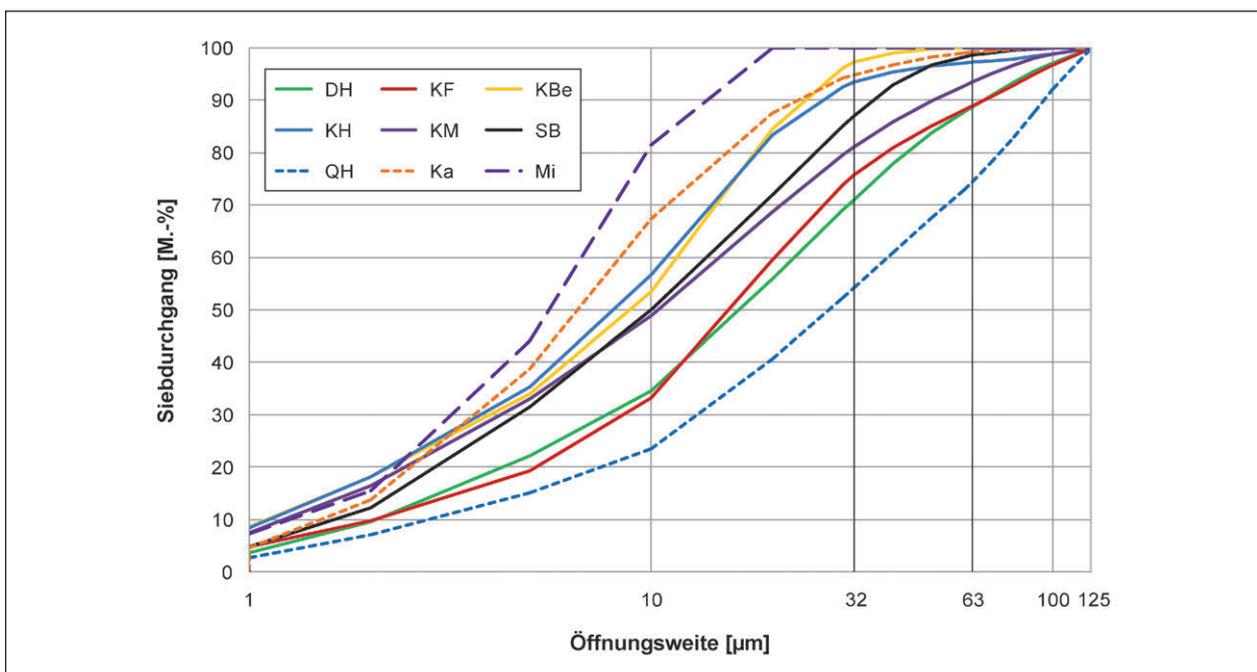


Bild 37: Korngrößenverteilung der Füller mittels Laser-Partikel-Sizer

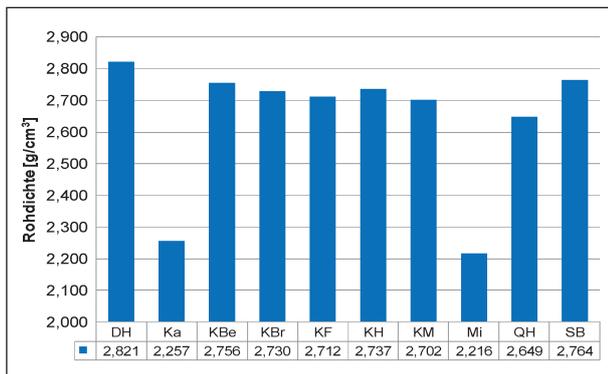


Bild 38: Rohdichte der Füller

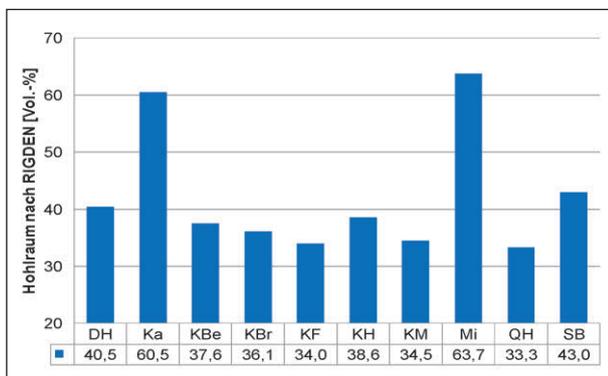


Bild 39: Hohraumgehalte der Füller

5.4.2 Kennwerte der Bitumen und Asphaltmörtel

An den Ausgangsbitumen und den Asphaltmörteln wurden nahezu die gleichen Untersuchungen durchgeführt. Daher sind deren Materialkennwerte im Folgenden zusammengefasst.

Die Ermittlung der Erweichungspunkte Ring und Kugel erfolgte entsprechend [DIN EN 1427, 2007]. Die daraus resultierenden Mittelwerte sind in Bild 40 für die Bitumen 20/30 und 30/45 sowie die damit hergestellten Asphaltmörtel zusammengefasst.

Den Tabellen A2 bis A5 des Anhangs sind die gemäß [DIN EN 14771, 2005] ermittelten Biegekrebstufigkeiten und m-Werte der Mörtel auf Basis der Bitumen 20/30 und 30/45 bei -5 °C zu entnehmen. Die hohe Viskosität der Mörtel DH30 und SB30 verhinderte die Herstellung normgerechter Balken. Daher musste auf deren Untersuchung verzichtet werden. Das füllergefreie Bindemittel wurde aufgrund der geringen Viskosität bei -16 °C analysiert.

Die temperaturabhängigen komplexen Schermoduln der Bitumen 20/30 und 30/45 und der damit hergestellten Mörtel sind in den Tabellen A6 bis A8

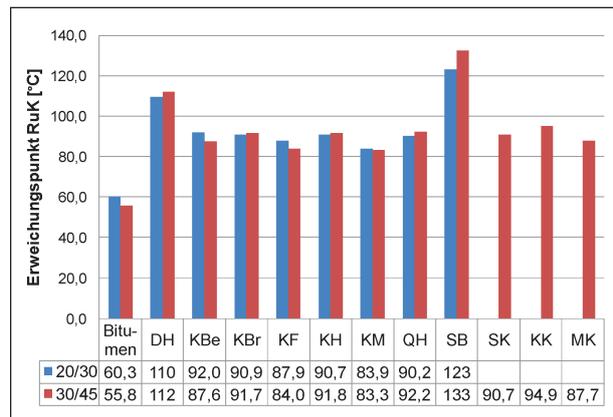


Bild 40: Erweichungspunkt RuK der Bitumen 20/30 und 30/45 sowie der mit damit hergestellten Mörtel

des Anhangs zusammengefasst. Auf die Darstellung der Phasenwinkel wurde verzichtet, da diese gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.3.3 nahezu unabhängig von der Füllerzugabe sind. Die in den Tabellen A6 bis A8 angegebenen Werte beruhen auf Doppelbestimmungen mit geringen Abweichungen, die den Empfehlungen der [DIN EN 14770, 2006] entsprechen. Bei den jeweiligen Überlappungstemperaturen (30 °C bei den Bitumen und 60 °C bei den Mörteln) erfüllten die Abweichungen die Vorgaben der DIN EN 14770 an die Präzision der Messergebnisse. Bei einigen Mörteln waren Ausreißer festzustellen, die umgehend verworfen und wiederholt wurden.

Die Kraft-Duktilität der Asphaltmörtel wurde in Anlehnung an die [DIN EN 13589, 2008] ermittelt. Aufgrund der hohen Verformungsbeständigkeit und der damit verbundenen Sprödigkeit führten bei den nach [TL Bitumen-StB 07, 20] maximalen Starttemperaturen von 25 °C bereits geringste Verformungen zum Reißen der Proben. Nach weiteren Vorversuchen mit 35 bzw. 40 °C, bei denen die Proben ebenfalls nach geringen Verformungen rissen, wurde die Prüftemperatur einheitlich zu 50 °C festgelegt.

In den Bildern 41 bis 43 sind die Mittelwerte der Kraft-Weg-Kurven der Mörtel auf Basis der Bitumen 30/45 und 20/30 dargestellt. Eine Untersuchung der reinen Bitumen erwies sich bei der gewählten Mess-temperatur von 50 °C aufgrund der geringen Binde-mittelviskosität als nicht durchführbar.

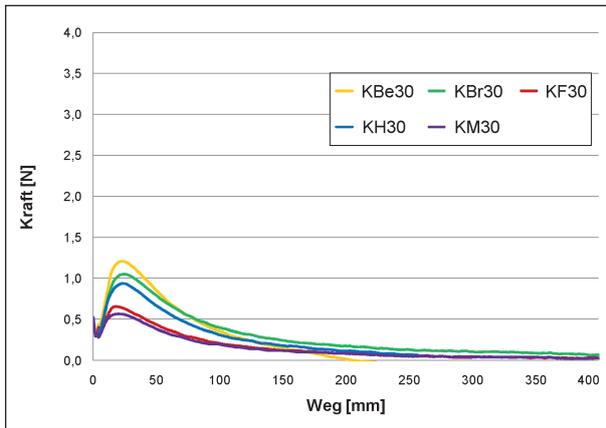


Bild 41: Kraft-Weg-Kurven der Kalksteinmörtel unter Verwendung des Bitumens 30/45, (Prüf­temperatur 50 °C)

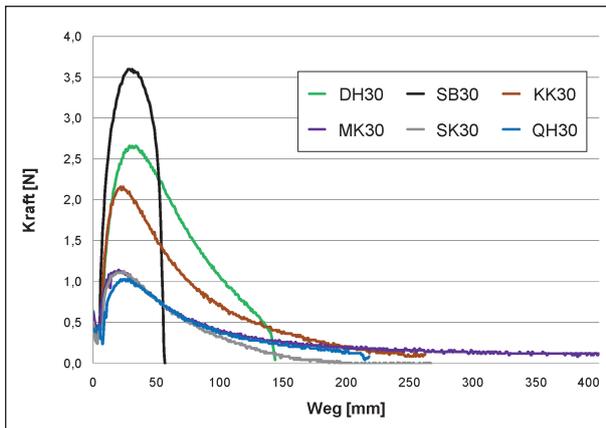


Bild 42: Kraft-Weg-Kurven der Mörtel DH30, SB30, KK30, MK30, SK30 und QH30, (Prüf­temperatur 50 °C)

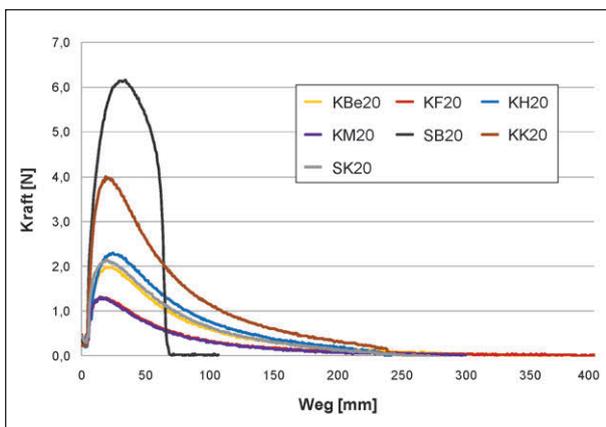


Bild 43: Kraft-Weg-Kurven der Mörtel unter Verwendung des Bitumens 20/30, (Prüf­temperatur 50 °C)

5.4.3 Eigenschaften der Gussasphalte unter Verwendung der unterschiedlichen Füller

Zur Überprüfung der Wirkung der Füller im Gussasphalt wurden die Varianten A11_{F1} bis A11_{F7} gemischt und bezüglich der Verarbeitbarkeit und der Verformungsbeständigkeit untersucht. Dabei erwies sich die Variante A11_{F3} aufgrund der sehr hohen Verformungsbeständigkeit als nicht verarbeitbar (Bild 44) und wurden folglich nicht untersucht.

Die temperaturabhängigen Rührwiderstandsmomente der vier verarbeitbaren Varianten wurden als Doppelbestimmung ermittelt. Deren gemittelte Funktionsverläufe sind in Bild 45 dargestellt.

Entsprechend dem in Kapitel 5.2 erläuterten Kriterium (max. 100 Ncm) wurden die minimalen Einbautemperaturen der Gussasphaltvarianten bestimmt und in Tabelle 15 zusammengestellt.



Bild 44: Gussasphalt-Variante A11_{F3} nach dem Mischen

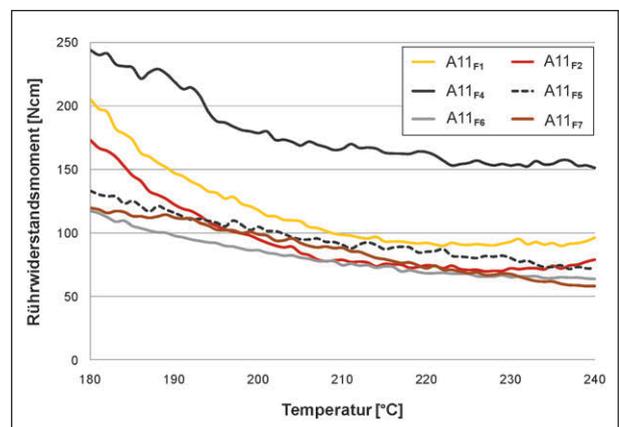


Bild 45: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Varianten A11_{F1} bis A11_{F7}

Variante [-]	Minimale Einbautemperatur [°C]
A11 _{F1}	209
A11 _{F2}	198
A11 _{F3}	nicht zu verarbeiten
A11 _{F4}	> 240
A11 _{F5}	203
A11 _{F6}	190
A11 _{F7}	200

Tab. 15: Minimale Einbautemperatur laut Rührwiderstandsmessung der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen

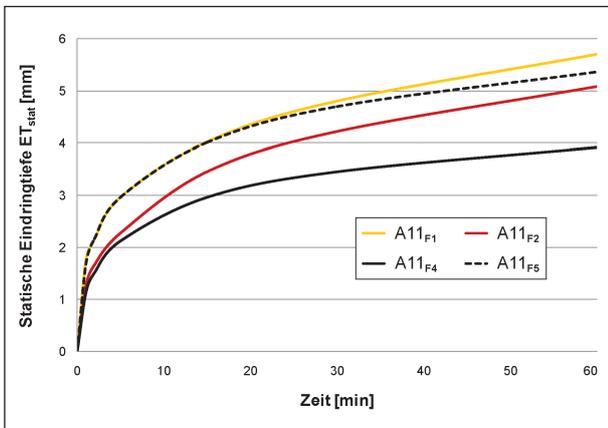


Bild 46: Statische Stempelindringtiefen der Varianten A11_{F1} bis A11_{F5}

Die statischen Stempelindringversuche wurden an den vier verarbeitbaren Gussasphaltvarianten gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 20, 2007] durchgeführt. Deren zeitabhängige Funktionsverläufe sind in Bild 46 dargestellt.

5.4.4 Kennwerte der feinen Gesteinskörnungen und der damit hergestellten Gussasphalte

Die Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen wurden gemäß [DIN EN 933, 2002] bestimmt. In Bild 47 sind die ermittelten Kennwerte der einzelnen Gesteinskörnungen zusammengefasst.

Bild 48 sind die Fließkoeffizienten ausgewählter Gemische unterschiedlicher feiner Gesteinskörnungen zu entnehmen.

Die Funktionsverläufe der temperaturabhängigen Rührwiderstandsmomente der in Tabelle 9 aufgelisteten Varianten (Gussasphalte, die sich lediglich

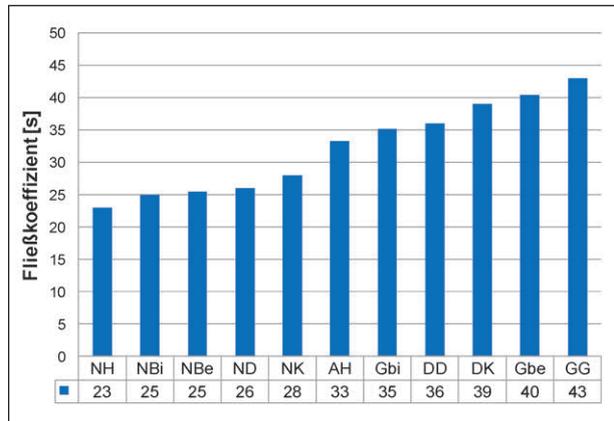


Bild 47: Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen

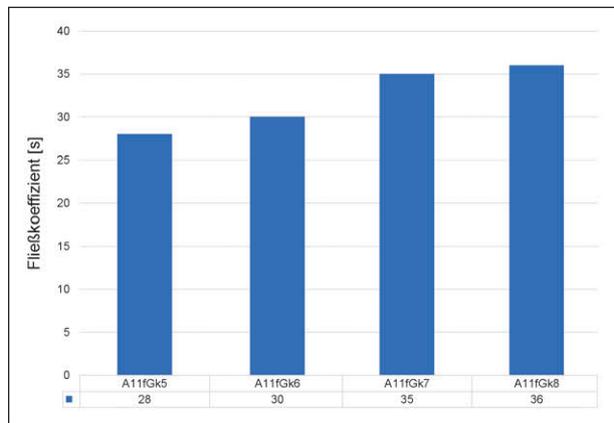


Bild 48: Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen der Varianten A11_{fGk5} bis A11_{fGk8}

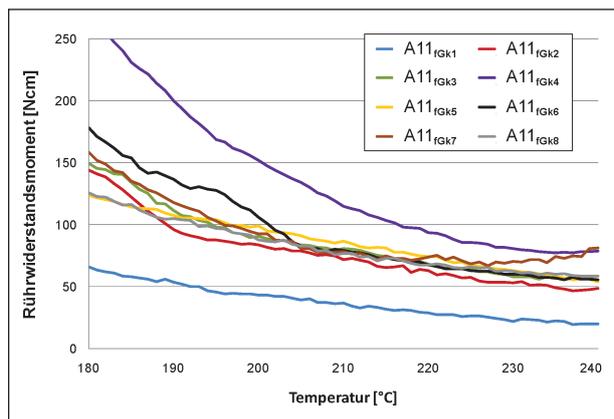


Bild 49: Rührwiderstandsmomente der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen

durch die feinen Gesteinskörnungen unterschieden) sind in Bild 49 zusammengefasst.

Entsprechend dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Kriterium (max. 100 Ncm) wurden die minimalen Einbautemperaturen der Gussasphaltvarianten bestimmt (Tabelle 16).

Variante [-]	Minimale Einbautemperatur [°C]
A11 _{fGk1}	< 180 °C
A11 _{fGk2}	190
A11 _{fGk3}	196
A11 _{fGk4}	217
A11 _{fGk5}	196
A11 _{fGk6}	202
A11 _{fGk7}	196
A11 _{fGk8}	193

Tab. 16: Minimale Einbautemperatur laut Rührwiderstandsmessung der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen

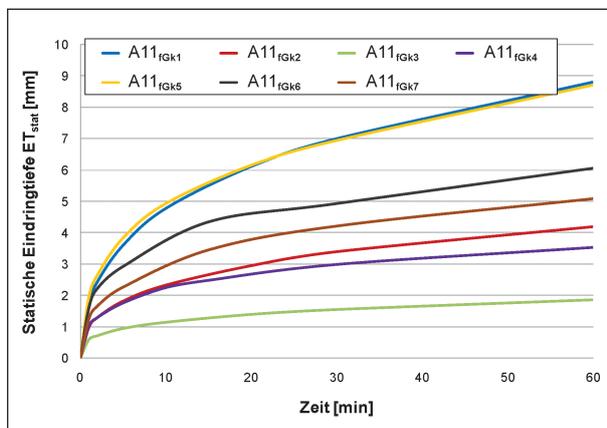


Bild 50: Statische Stempeleindringtiefen der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen

Entsprechend den Vorgaben der [TP Asphalt-StB, Teil 20, 2007] wurden die statischen Stempeleindringtiefen der Varianten A11_{fGk1} bis A11_{fGk7} ermittelt. In Bild 50 sind die zeitlichen Verläufe der gemittelten statischen Eindringtiefen dargestellt.

5.4.5 Resultate der Rüttelversuche

Die Rüttelversuche nach dem Verfahren von [RADENBERG, SANDER, 2007] wurden als Doppelbestimmungen durchgeführt. Zusätzlich wurden die beiden verwendeten Proben zweimal je Variante verdichtet und anschließend wieder aus dem Proctortopf ausgebaut. Aus den insgesamt vier Rütteldichten je Variante wurden die arithmetischen Mittel gebildet.

Aus den Rütteldichten wurden die Hohlraumgehalte bestimmt. Zu dieser Berechnung wurden die mittleren Rohdichten der Gesteinskörnungen in den jeweils verwendeten Zusammensetzungen ermittelt.

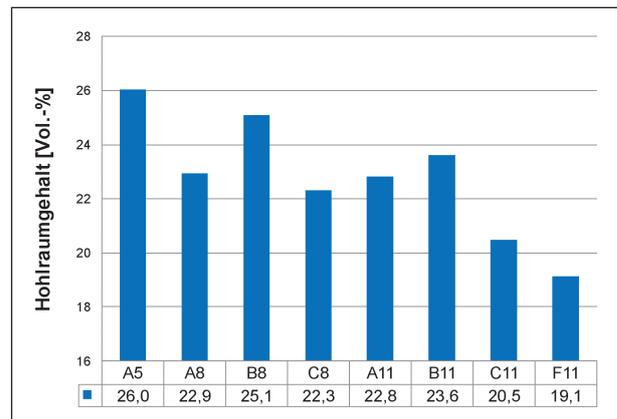


Bild 51: Hohlraumgehalte der feinen und groben Gesteinskörnungen der Varianten A5, A8, A11, B8, B11, C8, C11, F11 in den durch die Erstprüfung gegebenen Zusammensetzungen

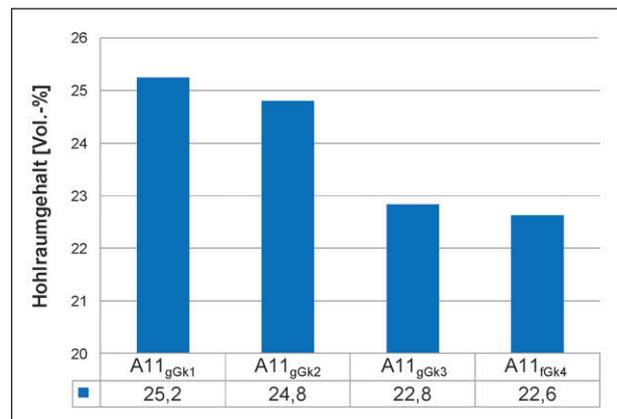


Bild 52: Hohlraumgehalte der feinen und groben Gesteinskörnungen der Varianten A11_{gGk1} bis A11_{gGk4}

In Bild 51 sind die Hohlraumgehalte der feinen und groben Gesteinskörnungen der Varianten A5, A8, A11, B8, B11, C8, C11 und F11 in den durch die Erstprüfungen gegebenen Zusammensetzungen dargestellt.

Die Hohlraumgehalte der Varianten A11_{gGk1} bis A11_{gGk4}, bei denen die feinen Bestandteile (Durchmesser kleiner 0,5 mm) abgesiebt wurden, sind in Bild 52 zusammengestellt.

6 Bewertung der Ansätze zur systematischen Optimierung

6.1 Beurteilung der Basis-Gussasphalte

6.1.1 Vergleich der statischen und dynamischen Eindringtiefe

Die Basis-Gussasphalte wurden bezüglich Zusammensetzung, Verarbeitungsverhalten und Verformungswiderstand untersucht. Die Verformungsbeständigkeit wurde dabei sowohl mittels statischem als auch mittels dynamischem Stempelndringversuch analysiert. In Bild 53 werden die dabei entstandenen Stempelndringtiefen nach einer Belastungszeit von 30 Minuten (statisch) bzw. nach 2.500 Lastzyklen (dynamisch) miteinander verglichen.

Bei allen untersuchten Gussasphalten ist die dynamische Eindringtiefe geringer als die statische. Zudem weisen die beiden verformungsbeständigsten Varianten sowohl bei der statischen als auch bei der dynamischen Prüfung die mit Abstand geringsten Eindringtiefen auf. Die Korrelation der beiden Versuchsreihen ist mit 0,5304 jedoch gering. Folglich ist die grundsätzliche Einordnung in verformungsbeständige und leicht verformbare Gussasphalte bei beiden Untersuchungsmethoden identisch. Bei detaillierteren Analysen sind jedoch deutliche Unterschiede in der Bewertung der Gussasphalte festzustellen. Daher sind die Untersuchungen nicht grundsätzlich als gleichwertig zu betrachten.

Ein Vorteil der dynamischen Prüfung ist die größere Spreizung der Messergebnisse. So variieren die statischen Eindringtiefen der neun Gussasphalte, die mit beiden Verfahren untersucht wurden, zwischen 1,70 und 3,27 mm. Die dynamischen Ein-

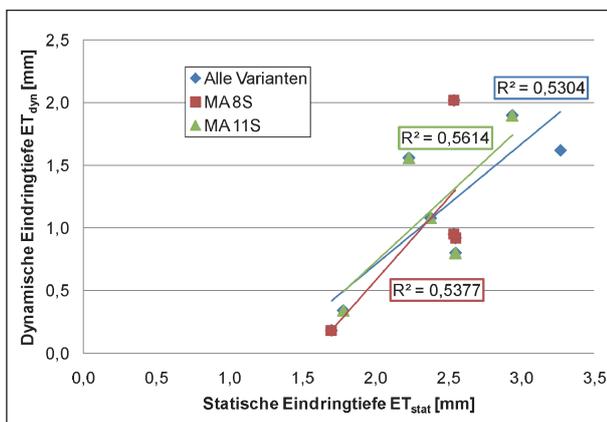


Bild 53: Vergleich zwischen statischer und dynamischer Stempelndringtiefe der Basis-Gussasphalte

dringtiefen weisen dagegen eine prozentual deutlich größere Spannweite von 0,18 bis 2,06 mm auf. Die Steigungen der Funktionsverläufe der Eindringtiefen zeigen noch charakteristischere Unterschiede (Bilder 28 bis 31). Die zeit- bzw. lastwechselabhängige Verformungszunahme, die bezüglich der Lebensdauer eines Gussasphalts kritischer zu betrachten ist als die anfängliche Verformung, wird somit bei der dynamischen Prüfung wesentlich deutlicher herausgestellt.

6.1.2 Zusammenhang zwischen Verarbeitungs- und Verformungsverhalten der Basis-Gussasphalte

Bei prinzipiell gleich konzipierten Gussasphalten bewirkt eine klassische Maßnahme zur Minderung des Verarbeitungswiderstandes (z. B. die Erhöhung des Bindemittelgehalts) zwangsläufig eine Reduzierung des Verformungswiderstandes. Mit den Bildern 54 und 65 wurde überprüft, ob dieser Zusammenhang auch bei dem Einsatz gänzlich unterschiedlicher Gussasphalt-Konzepte erhalten bleibt. Dazu sind den statischen (Bild 54) bzw. dynamischen (Bild 55) Eindringtiefen die minimalen Einbautemperaturen der verschiedenen Varianten gegenübergestellt.

Lediglich zwischen statischer Eindringtiefe und minimaler Verarbeitungstemperatur der vier untersuchten MA 8S-Varianten ist mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,8657 ein Zusammenhang festzustellen. Dies ist vermutlich nur als Zufall zu bewerten, da aufgrund der übrigen Bestimmtheitsmaße (R^2 maximal 0,2005) eine direkte Verknüpfung zwischen Verarbeitungs- und Verformungsverhalten auszuschließen ist. Folglich ist durch eine

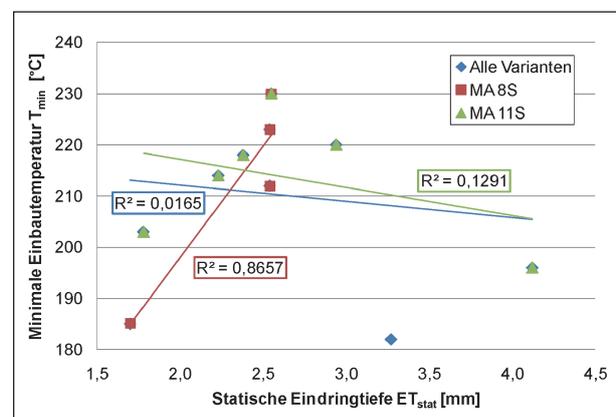


Bild 54: Gegenüberstellung der statischer Stempelndringtiefe und der minimalen Einbautemperatur gemäß Rührwiderstandsmoment der Basis-Gussasphalte

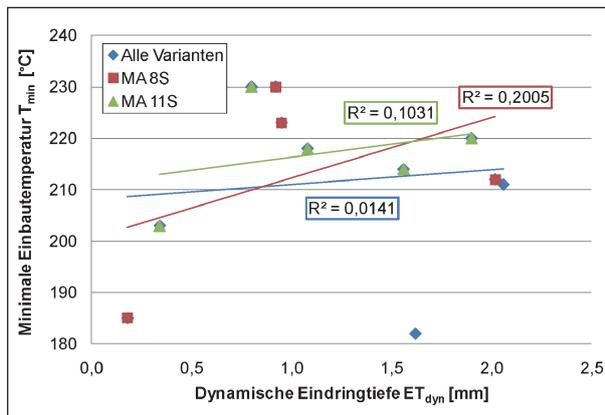


Bild 55: Gegenüberstellung der dynamischen Stempel Eindringtiefe und der minimalen Einbautemperatur gemäß Rührwiderstandsmoment der Basis-Gussasphalte

Optimierung der Zusammensetzung eine Reduzierung des Verarbeitungswiderstandes trotz Beibehaltung einer hohen Verformungsbeständigkeit möglich.

6.1.3 Bewertung der Basis-Gussasphalte

Ausschließlich durch den Vergleich der Zusammensetzungen der Basis-Gussasphalte sind Einflussgrößen auf die Gussasphalteigenschaften nicht festzustellen. Beispielsweise sind die Varianten A11, E11 und F11 sehr ähnlich zusammengesetzt. Dennoch ist der A11 wesentlich Verformungsbeständiger und weist dabei einen geringeren Verarbeitungswiderstand auf. Gleiches gilt für die Varianten A8 und E8. Trotz vergleichbarer Zusammensetzung weist der A8 deutlich bessere Eigenschaften auf. Daher sind keine mathematischen Korrelationen zwischen den Zusammensetzungen und den Eigenschaften aufzustellen. Die Vielzahl von variierenden Einflussfaktoren ermöglicht keine exakte Quantifizierung der einzelnen Faktoren.

Als Trend ist jedoch festzustellen, dass hohe Bindemittelgehalte zu einer deutlichen Reduzierung der Verformungsbeständigkeit führen, ohne die Verarbeitungswiderstände adäquat zu verringern. Dies verdeutlichen besonders die Varianten G5 und D11. Bei beiden ist die geringe Verformungsbeständigkeit auf die um 1,0 (G5) bzw. 1,2 M.-% (D11) gegenüber der Erstprüfung erhöhten Bindemittelgehalte zurückzuführen. Zudem wurde an dem rückgewonnenen Bitumen des D11 mit 77,8 °C eine im Vergleich mit der Erstprüfung (84,5 °C) geringe Viskosität festgestellt.

Entgegen dem Trend sind die Varianten A8 und A11 trotz hohen Bindemittelgehalts sehr verformungsbeständig. Bei diesen Bitumen wurden jedoch nach der Extraktion sehr hohe Viskositäten (EP RuK 95,9 bzw. 89,6 °C) analysiert.

6.2 Eigenschaften und Einflüsse der Füller

6.2.1 Zusammenhang zwischen den granulometrischen Eigenschaften und der versteifenden Wirkung (ΔEP RuK) der Füller

Die versteifenden Eigenschaften der untersuchten Füller bzw. Füllergemische sind nahezu unabhängig von den verwendeten Bitumen (Bild 40). Lediglich bei den Füllern KBe und KF sind die Erweichungspunkte RuK bei Verwendung des höher viskosen Bitumen 20/30 (EP RuK 60,3 °C) deutlich höher als in Kombination mit dem Bitumen 30/45 (EP RuK 55,8 °C). Im Gegensatz dazu versteift das Schiefermehl (SB) das Bitumen 30/45 (EP RuK 133,0 °C) deutlich stärker als das Bitumen 20/30 (EP RuK 123,0 °C). Bei den übrigen Füllern bestehen nur geringe Unterschiede zwischen den Steifigkeiten bei Verwendung der unterschiedlichen Bitumen. Folglich sind bezüglich des Erweichungspunktes RuK die Einflüsse der Füller dominanter als die der Bitumen.

Die Erweichungspunkte der Mörtel unter Verwendung des Schiefermehls (SB) sind deutlich höher als die der übrigen Varianten (Bild 40), die abgesehen von dem Diabas (DH) nur geringe Unterschiede zueinander aufweisen. Die Kalksteinfüller können in zwei Gruppen aufgeteilt werden: während die Varianten KF und KM als geringer versteifend zu beurteilen sind, liegen die Erweichungspunkte RuK der übrigen Kalksteine im Mittel 5,8 °C höher. In der gewählten Zugabemenge von 10 M.-% (Ka und Mi) bzw. 25 M.-% (SB) bewirken die Zusätze nur eine geringe Steigerung der versteifenden Wirkung. Die Erhöhungen der Erweichungspunkte der Füllergemische gegenüber der Variante KF30 betragen zwischen 3,7 (MK) und 10,9 °C (KK).

Ein direkter Zusammenhang zwischen den in Bild 56 dargestellten Korngrößenverteilungen der Füller und Füllergemische und der Erhöhung des Erweichungspunktes RuK ist nicht festzustellen. So unterscheiden sich die bezüglich versteifender Wirkung nahezu identisch Varianten KF und KM deut-

lich voneinander. Die Korngrößenverteilung des KM weist dagegen nur geringere Unterschiede zu denen der übrigen Kalksteine und dem Schiefermehl (SB) auf.

Zwischen Hohlraumgehalt nach RIGDEN und den Erweichungspunkten RuK sind dagegen Zusammenhänge festzustellen. Dazu sind die Füller bzw. Füllergemische in Bild 57 in zwei Gruppen nahezu identischer Korngrößenverteilung aufgeteilt. Innerhalb der Gruppe der feinkörnigeren Füller (KBe, KH, KM und SB) ist so mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,865 eine gute Korrelation zwischen Hohlraumgehalt nach RIGDEN und den Erweichungspunkten RuK gegeben. Bei den Zusätzen Kalkhydrat, Microsilica und Schiefermehl besteht dagegen trotz nahezu identischer Korngrößenverteilung kein Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt nach RIGDEN und den Erweichungspunkten RuK. Hier beeinflussen andere granulometrische Eigenschaften den Hohlraumgehalt nach RIGDEN.

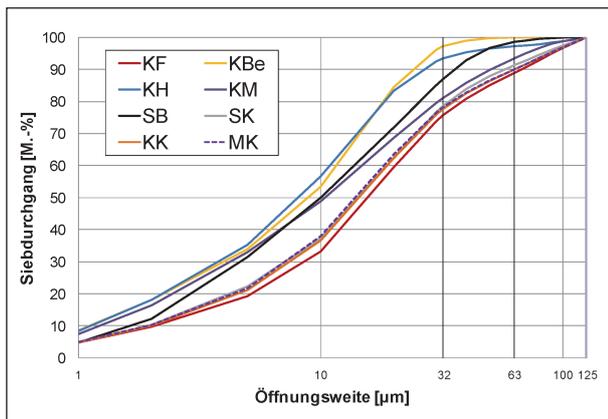


Bild 56: Korngrößenverteilungslinien ausgewählter Füller bzw. Füllergemische

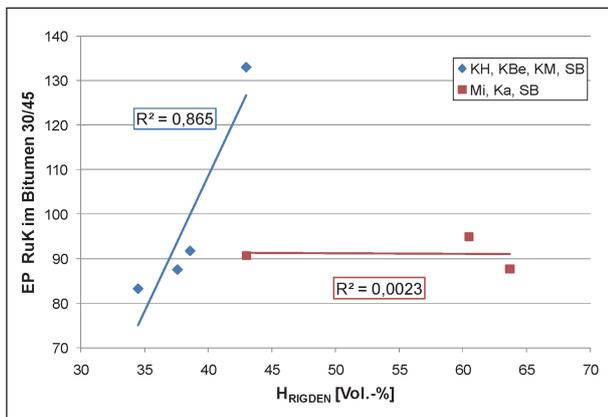


Bild 57: Einfluss des Hohlraumgehalts nach RIGDEN auf die versteifenden Eigenschaften

6.2.2 Kälteverhalten der Mörtel mittels BBR

Entsprechend [DIN EN 14771, 2005] werden die rheologischen Messwerte Biegebiegecreepsteifigkeit und m-Wert der getesteten Mörtel im Folgenden einheitlich nach einer Belastungszeit von 60 Sekunden angegeben.

Überprüfung der allgemeinen Aussagekraft der BBR-Messungen für Asphaltmörtel

Da die Untersuchung der Kälteeigenschaften von Asphaltmörteln mittels BBR bislang kein Standardverfahren ist, wurde vorab die allgemeine Aussagekraft überprüft. Dazu wurden die Biegebiegecreepsteifigkeiten und die m-Werte, die an den Asphaltmörteln unter Verwendung der Bitumen 20/30 und 30/45 bei -5 °C ermittelt wurden, auf die gleichen rheologischen Größen der Basisbitumen (bei -16 °C) bezogen. In den Bildern 58 und 59 sind die prozentualen Unterschiede zwischen den Basisbitumen und den

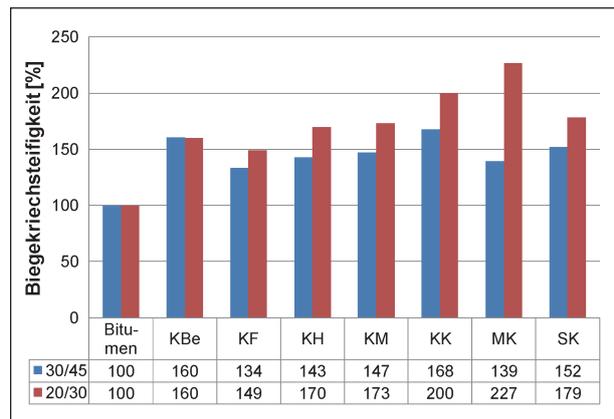


Bild 58: Biegebiegecreepsteifigkeit der Mörtel bei -5 °C im Verhältnis zu dem jeweiligen Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

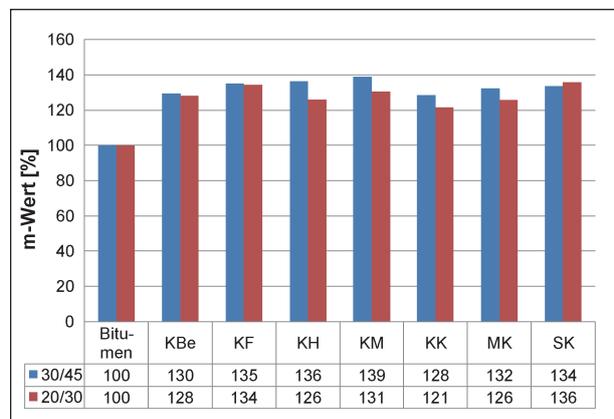


Bild 59: m-Wert der Mörtel bei -5 °C im Verhältnis zu dem jeweiligen Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

Asphaltmörteln abzulesen. Ein Wert von 160 % bedeutet, dass der entsprechende Wert um 60 % höher als bei dem Basisbitumen ist, obwohl mit unterschiedlicher Prüftemperatur gearbeitet wurde.

Die prozentualen Steigerungen der Biegekriechsteifigkeiten sind mit Ausnahme des Füllers KBe bei Verwendung des Bitumen 20/30 stets größer als bei dem Bitumen 30/45. Dabei ist die Rangfolge der Füller bezüglich der steifigkeitserhöhenden Wirkung bei beiden Basisbitumen nahezu identisch. Lediglich die Beurteilung des MK fällt unterschiedlich aus. Folglich werden die Füller unabhängig vom Basisbitumen gleich bewertet.

Die Beurteilung des m-Werts fällt dagegen bei beiden Basisbitumen unabhängig aus. So ist die prozentuale Erhöhung des m-Werts durch zwei Füller bei beiden Bitumen nahezu identisch, fällt bei vier Füllern im Bitumen 30/45 stärker und bei einem Füller schwächer aus. Grundsätzlich sind die Unterschiede aber eher gering.

Aufgrund der prinzipiell gleichen Wirkung der Füller in den verschiedenen Basisbitumen können relativ gut abgesichert Aussagen über die Biegekriechsteifigkeiten gegeben werden. Die Aussagekraft der m-Werte ist dagegen weniger abgesichert.

Beurteilung des Kälteverhaltens der untersuchten Asphaltmörtel

Die Bewertung des Kälteverhaltens zeigt bei einigen Mörteln Unterschiede zwischen den verschiedenen rheologischen Größen (Bilder 60 und 61).

Innerhalb der Gruppe der vier Kalksteinfüller weist der KF die geringste Biegekriechsteifigkeit auf. Die drei übrigen Kalksteine sind deutlich steifer und damit rissanfälliger.

Die Relaxationsfähigkeit (m-Wert) der Varianten KF und KM ist dagegen nahezu identisch. Auch bei diesem Kriterium sind der KBe und der KH aufgrund der niedrigeren m-Werte rissanfälliger.

Sämtliche Zusätze wirken nachteilig auf die Kälteeigenschaften. So steigt die Biegekriechsteifigkeit durch die Zugabe von Microsilica bzw. Kalkhydrat stark an, während das Schiefermehls nur eine geringe Erhöhung verursacht.

Bezüglich der m-Werte fällt der als negativ zu bewertende Rückgang durch die Zugabe von Schiefermehl sehr gering aus. Eine deutliche Reduzie-

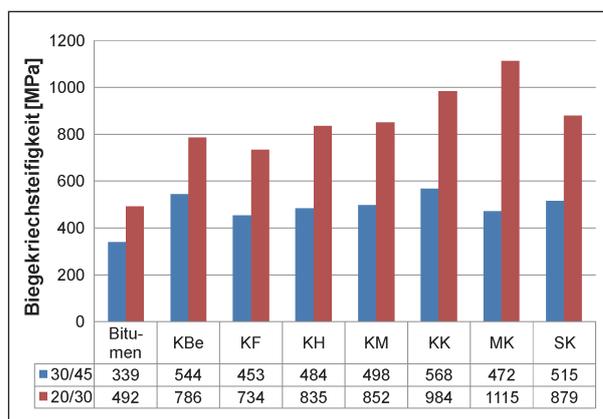


Bild 60: Biegekriechsteifigkeit der Mörtel bei -5 °C und der Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

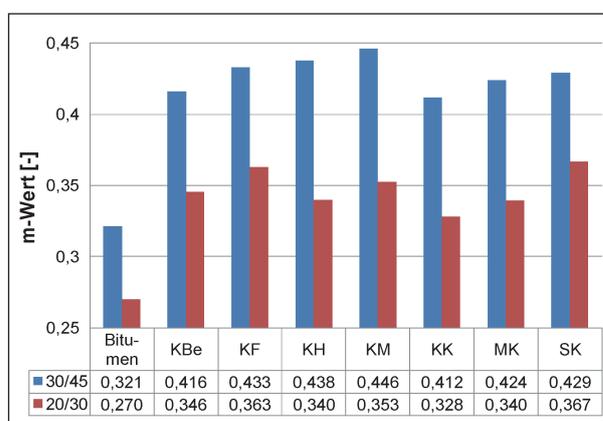


Bild 61: m-Wert der Mörtel bei -5 °C und der Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

ring des Relaxationsvermögens wird durch die Zugabe von Microsilica bewirkt, während bei Verwendung des Kalkhydrats die geringsten m-Werte gemessen werden.

6.2.3 Duktilitätsverhalten der Mörtel

Zur quantitativen Beschreibung des Duktilitätsverhaltens der Mörtel wird die Formänderungsarbeit – abweichend von der [DIN EN 13703; 2003] – zwischen dem Versuchsbeginn und einer Dehnung von 200 mm bestimmt. So wird durch die Formänderungsarbeit der für die verschiedenen Füller bzw. Füllergemische charakteristische Bereich beschrieben (siehe Bilder 41 bis 43).

Überprüfung der allgemeinen Aussagekraft der Kraft-Duktilitäts-Messungen für Asphaltmörtel

Analog zu den Untersuchungen mittels BBR ist die Bestimmung des Kraft-Duktilitäts-Verhaltens eben-

falls kein Standardverfahren bei Asphaltmörteln. Daher wurde vorab überprüft, ob die Bewertung der Asphaltmörtel bei beiden Bitumen (20/30 und 30/45) identisch ist (Bilder 62 und 63). Dazu wurden in Bild 62 auf der Abszisse die Kraftmaxima der Asphaltmörtel unter Verwendung des Bitumens 20/30 und auf der Ordinate die Kraftmaxima der Asphaltmörtel unter Verwendung des Bitumens 30/45 angetragen. Für jeden Füller ergibt sich somit durch die Kraftmaxima der beiden mit diesem hergestellten Mörtel ein Wertepaar. Diese sechs Wertepaare werden durch eine Regressionsgrade mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9762 erfasst.

In Bild 63 ist das zu Bild 62 analoge Vorgehen für die Formänderungsarbeit dargestellt. Ebenfalls ist mit einem Regressionskoeffizienten von 0,8945 ein direkter Zusammenhang zwischen den Mörteln auf Basis der Bitumen 20/30 und 30/45 gegeben. Folglich sind sowohl die Formänderungsarbeit als auch das Kraftmaximum charakteristisch für den Einfluss des jeweiligen Füllers.

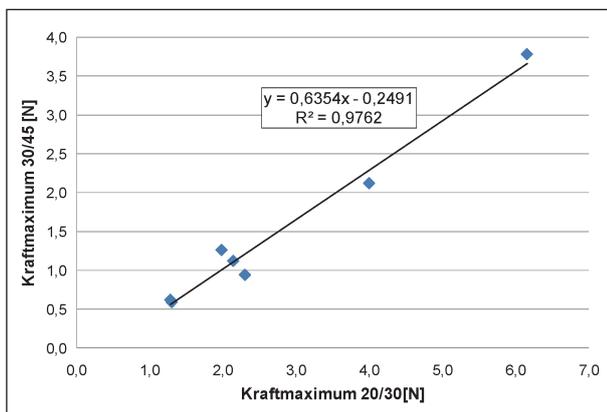


Bild 62: Korrelation der Kraftmaxima der Mörtel auf Basis der Bitumen 20/30 und 30/45 (Mischungsverhältnis F/B = 70/30, Messtemperatur 50 °C)

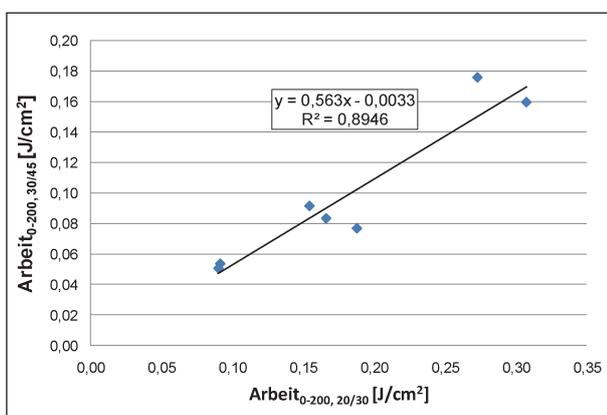


Bild 63: Korrelation der Formänderungsarbeiten der Mörtel auf Basis der Bitumen 20/30 und 30/45 (Mischungsverhältnis F/B = 70/30, Messtemperatur 50 °C)

Beurteilung des Kraft-Duktilitäts-Verhaltens der untersuchten Asphaltmörtel

Während der Dehnung der Mörtel SB20 und SB30 nahm der Verformungswiderstand zu Versuchsbeginn stark zu, hielt in der Folge über einen Weg von etwa 50 mm einen sehr hohen Wert, bevor die Proben abrupt rissen. Bei den anderen Mörteln ging der Verformungswiderstand nach Erreichen des Kraftmaximums umgehend und schnell fortschreitend zurück. Die aufzubringende Formänderungskraft näherte sich in der Folge asymptotisch dem Wert 0 N bevor die Mörtelfäden rissen (Bilder 41 bis 43).

Das prinzipiell identische Materialverhalten wird auch durch Bild 64 verdeutlicht, in dem je Asphaltmörtel das Kraftmaximum auf der Abszisse und die Formänderungsarbeit auf der Ordinate angetragen sind. Da die Kraft-Duktilitäts-Kurven mit Ausnahme der Schiefermehl-Variante prinzipiell gleich verlaufen ist die geleistete Formänderungsarbeit proportional zu dem jeweiligen Kraftmaximum. Dies wird im Fall der Mörtel unter Verwendung des Bitumens 20/30 durch den Korrelationskoeffizienten von 0,9651 belegt (Bild 64).

Den geringsten Verformungswiderstand bei der Messtemperatur von 50 °C bewirken die Füller KF und KM (Bild 65). Die Kraftmaxima und Formänderungsarbeiten der Mörtel unter Verwendung der beiden anderen Kalksteinfüller sind dagegen um etwa 60 % (KBe) bzw. 80 % (KH) größer.

Durch den Zusatz von 25 M.-% Schiefermehl zu dem Füller KF entspricht die Steifigkeit des resultierenden Mörtels etwa dem der Varianten KBe20 bzw. KH20.

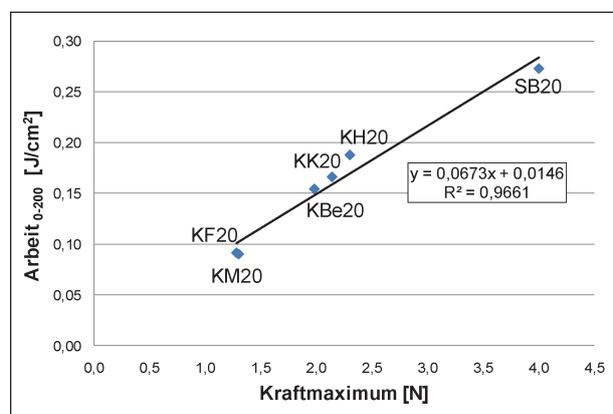


Bild 64: Korrelation zwischen Kraftmaximum und Formänderungsarbeit der Mörtel auf Basis des Bitumen 20/30 (Mischungsverhältnis F/B = 70/30, Messtemperatur 50 °C)

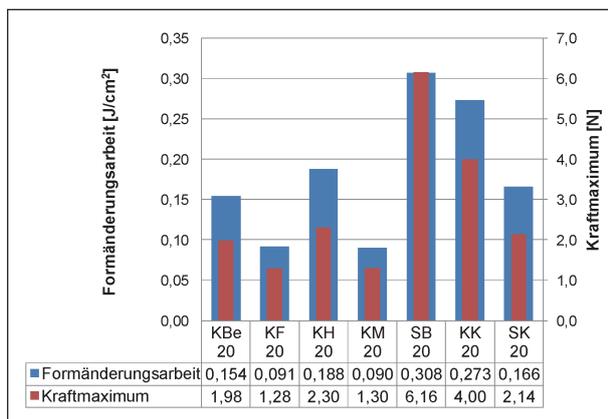


Bild 65: Kraftmaximum und Formänderungsarbeit der Mörtel auf Basis des Bitumen 20/30 (Mischungsverhältnis F/B = 70/30, Messtemperatur 50 °C)

Durch 10 M.-% Kalkhydrat steigt der Verformungswiderstand des Mörtels KK20 bei der Messtemperatur von 50 °C auf etwa das Dreifache gegenüber dem reinen KF20.

Das Kraftmaximum der Variante SB20 liegt im Gegensatz zu dem KK20 nochmals um 54 % höher. Aufgrund des früheren Reißens beträgt die Differenz der Formänderungsarbeiten nur 13 %. Da die Verformungen im Asphalt im Allgemeinen sehr gering sind, ist der Unterschied zwischen den Verformungswiderständen dieser Varianten entsprechend der Kraftmaxima als hoch zu bewerten.

6.2.4 Temperaturabhängig versteifende Wirkung mittels DSR

Mit dem DSR wurden die versteifenden Eigenschaften der Füller in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. Durch einen Vergleich zwischen den Wirkungen bei unterschiedlichen Temperaturen können die Füller bezüglich ihrer Eignung im Gussasphalt beurteilt werden. Als Kriterium dient dabei, dass zur Maximierung der Verformungsbeständigkeit bei hohen Gebrauchstemperaturen die Steifigkeit groß sein muss, während sie im Verarbeitungstemperaturbereich zu minimieren ist.

Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der komplexen Schermoduln von Bitumen erfolgt die Skalierung der Ordinate bei Betrachtung eines größeren Temperaturbereichs im Allgemeinen im logarithmischen Maßstab (vgl. Kapitel 3.3.3). Gemäß Bild 66 sind bei dieser Darstellungsweise nur sehr große Differenzen zwischen den Funktionsverläufen der verschiedenen Mörtel feststellbar. Um gerin-

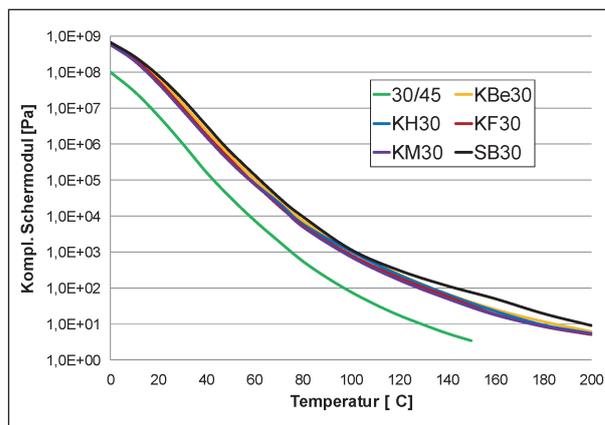


Bild 66: Temperaturabhängige komplexe Schermoduln verschiedener Mörtel (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

gere Unterschiede erkennbar zu machen, werden für die Analyse der Gesteinsfüller in den folgenden Abbildungen Referenzmörtel (KF20 bzw. KF30) festgelegt und die übrigen Varianten darauf bezogen. Dazu werden die komplexen Schermoduln dieser Referenzmörtel als Bezugsgröße bei jeder Temperatur zu 100 % gesetzt. Die Schermoduln der übrigen Varianten werden als Prozentwert des Schermoduls der Referenzprobe angegeben. Dadurch kann die logarithmische Skalierung der Ordinate entfallen und geringere Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten werden erkennbar.

Beurteilung der komplexen Schermoduln der untersuchten Asphaltmörtel

In Bild 67 sind die komplexen Schermoduln der Mörtel unter Verwendung des Bitumen 30/45 und der verschiedenen Gesteinsarten dargestellt.

Die Wirkung des Quarzes (QH) ist mit dem Referenzfüller (KF) unabhängig von der Temperatur nahezu identisch. Die etwas geringere Steifigkeit bei Gebrauchstemperaturen und geringfügig höhere Steifigkeit im Verarbeitungstemperaturbereich ist zu vernachlässigen. Da der Einfluss des Quarzfüllers nicht besser ist als der des KF wird dieser im Gussasphalt selten verwendete Füller nicht weiter untersucht.

Deutlicher ist der Unterschied zwischen dem Referenzfüller (KF) und dem Diabas (DH). Dessen Wirkung auf den Mörtel ist als wesentlich schlechter zu bewerten. Die Steifigkeit des DH30 ist im Verarbeitungsbereich etwa doppelt so hoch, während sie bei hohen Gebrauchstemperaturen nur um etwa ein Drittel höher ist. Folglich ist der untersuchte Diabas

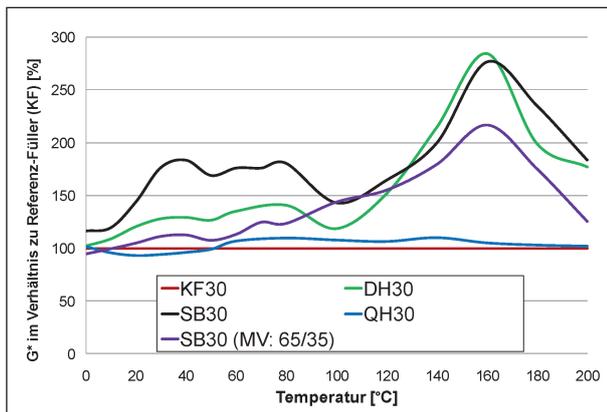


Bild 67: Temperaturabhängige versteifende Wirkung der verschiedenen Gesteinsarten anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

(DH) zumindest für den Gebrauch im Gussasphalt nicht geeignet. In den weiteren Analysen wird er daher nicht berücksichtigt.

Bei Verwendung des Schiefermehls (SB) ist das Verarbeitungsverhalten mit dem des Diabas (DH) nahezu identisch. Im Gegensatz zu der Variante DH30 liegen die komplexen Schermoduln bei dem SB30 im hohen Gebrauchstemperaturbereich jedoch um etwa 80 % über denen des Referenzmörtels (KF30). Damit ist die Erhöhung der versteifenden Wirkung im Vergleich zu dem Mörtel KF30 im Verarbeitungs- und Gebrauchstemperaturbereich nahezu identisch. In einer geringeren Zugabemenge kann die versteifende Wirkung des Schiefermehls somit dem Referenzfüller gleichwertig sein. Um dies zu überprüfen wurde abweichend von den sonstigen Mörteln das Schiefermehl zusätzlich im gravimetrischen Mischungsverhältnis Füller/Bitumen von 65/35 untersucht (SB30*). Der Funktionsverlauf des komplexen Schermoduls dieser Variante verläuft nahezu parallel zu jenem des SB30. Sowohl im Verarbeitungs- als auch im hohen Gebrauchstemperaturbereich versteift der SB30* um etwa 20 % stärker als der Referenzmörtel KF30. In einer noch geringeren Dosierung ist die Eignung des Schiefermehls folglich in Bezug auf die versteifende Wirkung dem Kalkstein aus Flandersbach (KF) gleichwertig.

Bei der Analyse der Mörtel unter Verwendung des Bitumens 20/30 ist die Wirkung des Schiefermehls (SB20) vorteilhafter einzuschätzen. Wie in Bild 68 dargestellt, beträgt der komplexe Schermodul im hohen Gebrauchstemperaturbereich nahezu das Dreifache des Referenzmörtels (KF20), während die Differenz oberhalb von 100 °C unter 100 % liegt.

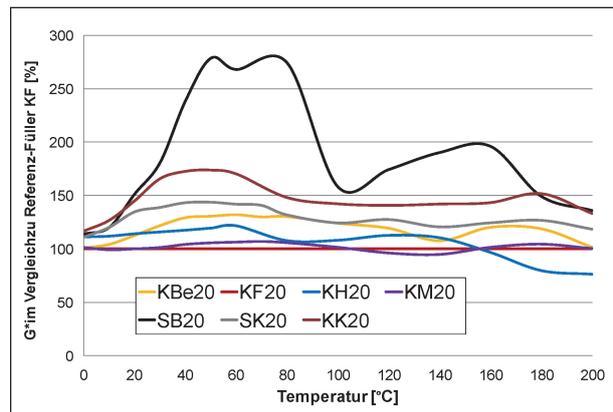


Bild 68: Temperaturabhängig versteifende Wirkung ausgewählter Füller anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 20/30, Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch die Verwendung des Schiefermehls bei einer entsprechenden Reduzierung der Zugabemenge trotz Aufrechterhaltung der angestrebten hohen Verformungsbeständigkeit die Verarbeitungswiderstand verringert werden kann.

Die versteifenden Wirkungen der Kalksteinfüller weisen weitaus geringere Differenzen auf (Bild 69). Lediglich der komplexe Schermodul des Füllers aus Bernburg (KBe30) liegt im gesamten Temperaturbereich im Mittel um etwa 30 % über dem Referenzmörtel (KF30). Eine klare Tendenz zu einer besseren Verarbeitbarkeit oder Verformungsbeständigkeit ist jedoch nicht festzustellen. Diese stärker versteifende Wirkung des Füllers aus Bernburg wird anhand des Mörtels KBe20 bestätigt (Bild 68). Zudem weist der Funktionsverlauf des komplexen Schermoduls des KBe20 im Vergleich zu dem KF20 einen Trend zu geringerer Versteifung im Verarbeitungstemperaturbereich auf. In einer geringeren Dosierung kann der Füller aus Bernburg demnach die Gussasphalteeigenschaften positiv beeinflussen.

Die geringste versteifende Wirkung ist bei dem Kalksteinfüller aus Medenbach (KM) festzustellen (vgl. Einfluss auf EP RuK). Dabei sind die Differenzen zu dem Referenzfüller (KF) sehr gering. In dem Mörtel auf Basis des Bitumen 30/45 sind die komplexen Schermoduln im Mittel etwa 10 % geringer, während in Verbindung mit dem Bitumen 20/30 nahezu identische Steifigkeiten gemessen werden.

Ein Vergleich der Kalksteine aus Flandersbach und Hehlen zeigt im Bitumen 20/30 und 30/45 ein entgegengesetztes Materialverhalten. Im Mörtel unter Verwendung des Bitumens 30/45 ist die versteifen-

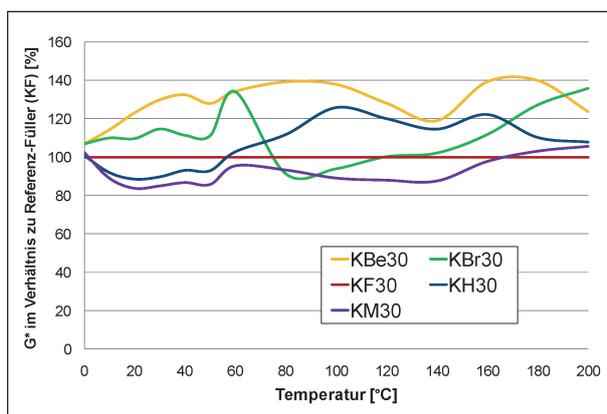


Bild 69: Temperaturabhängige versteifende Wirkung der Füller verschiedener Kalksteinfüller anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

de Wirkung des KH30 unter 60 °C geringer, während bei höheren Temperaturen die komplexen Schermoduln des KF30 niedriger sind. In Kombination mit dem Bitumen 20/30 ist dagegen der Füller KH als besser zu bewerten, da die Steifigkeit unter 140 °C höher und oberhalb davon niedriger ist.

Der Füller aus Bruchsal versteift im Gebrauchs- wie im Verarbeitungstemperaturbereich stark. Da die komplexen Schermoduln relativ zu den übrigen Mörteln ab 140 °C kontinuierlich zunehmen, ist der Füller KBr für den Gebrauch im Walzasphalt besser geeignet als im Gussasphalt. Daher wird der Kalksteinfüller aus Bernburg nicht weiter untersucht.

Alle Füllergemische versteifen deutlich stärker als der reine Kalkstein aus Flandersbach (KF) (Bild 70). Dabei bewirkt der Teilersatz durch 25 M.-% Schiefermehl im Mörtel SK30 im Vergleich zu den Füllergemischen die geringste Erhöhung des komplexen Schermoduls. Die versteifende Wirkung dieser Variante ist im Gegensatz zu dem Referenzfüller KF im hohen Gebrauchstemperaturbereich am stärksten und nimmt oberhalb davon kontinuierlich ab. Diese positive Tendenz ist sowohl im Bitumen 20/30 (Bild 68) als auch im Bitumen 30/45 festzustellen.

Der Teilersatz des KF durch das Microsilica bewirkt im Mörtel MK30 oberhalb von 30 °C eine nahezu temperaturunabhängige Erhöhung des komplexen Schermoduls um etwa 60 %. Zur Herstellung eines verarbeitbaren Gussasphalts wäre eine Reduzierung des Füllergehalts notwendig, ohne dadurch die Verformungsbeständigkeit negativ zu beeinflussen. Die deutliche Abnahme der versteifenden Wirkung unterhalb von 30 °C deutet jedoch auf eine Verbesserung des Kälteverhaltens hin. Daher wird dieser Zusatz trotz der geringen Eignung für den

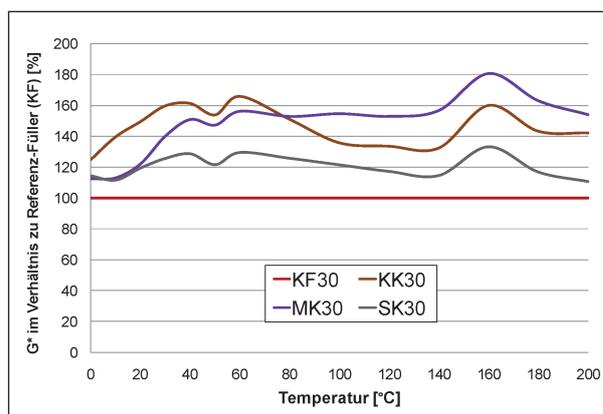


Bild 70: Temperaturabhängig versteifende Wirkung der Füllergemische anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

Einsatz im Gussasphalt weiter untersucht um Erkenntnisse über seine Einflüsse zu gewinnen.

Die Zugabe des Kalkhydrats bewirkt in beiden Mörteln (KK20 und KK30) eine Erhöhung des komplexen Schermoduls im hohen Gebrauchstemperaturbereich um etwa 60 %. Mit zunehmender Temperatur nimmt die versteifende Wirkung kontinuierlich ab und beträgt im Verarbeitungstemperaturbereich nur noch ca. 40 %. Durch eine geringeren Zugabemenge ist somit eine Verbesserung der Gussasphalteigenschaften zu erwarten.

Überprüfung der allgemeinen Aussagekraft der DSR-Messungen für Asphaltmörtel

Lediglich der Kalksteinfüller aus Hehlen, bei dessen Untersuchung große Streuungen der Messergebnisse auftraten, wird in den Mörteln KH20 und KH30 unterschiedlich bewertet. Die Einflüsse der übrigen Füller sind dagegen weitestgehend unabhängig von dem Basisbitumen (20/30 oder 30/45). Daher sind die an den Mörteln auf Basis des Bitumens 30/45 bestimmten komplexen Schermoduln repräsentativ für die Einflüsse der Füller.

Korrelation zwischen DSR- und BBR- bzw. Kraft-Duktilitäts-Messungen

Die niedrigste Messtemperatur zur Bestimmung der komplexen Schermoduln lag mit 0 °C nur geringfügig über jener der BBR-Untersuchungen (-5°). Folglich ist davon auszugehen, dass die Steifigkeiten bei beiden Verfahren gleich zu bewerten sind. Bei Betrachtung aller untersuchten Mörtel ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,3597 jedoch kein linearer Zusammenhang zwischen den Biegekiechsteifig-

keiten und den komplexen Schermodul festzustellen (Bild 71).

Die versteifende Wirkung der Zusätze wirkt sich bei den DSR-Messungen deutlich stärker aus als bei den BBR-Messungen. So besteht sowohl innerhalb der Gruppe der gemischten Füller als auch innerhalb der Gruppe der Füller ohne Zusätze jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Messungen. Da bislang nicht geklärt werden kann, welches Messverfahren realitätsnähere Ergebnisse liefert, werden im Folgenden für Vergleiche von Füllern und Füllergemischen beiden Kriterien berücksichtigt (siehe Kapitel 6.2.5).

Zwischen den Verformungswiderständen bei der Kraft-Duktilitäts-Prüfung und bei der DSR-Messung – jeweils bei 50 °C – besteht prinzipiell ein linearer Zusammenhang. Mit 0,6353 ist das Bestimmtheitsmaß zwischen Kraftmaximum und komplexem Schermodul jedoch gering (Bild 72). Da bei

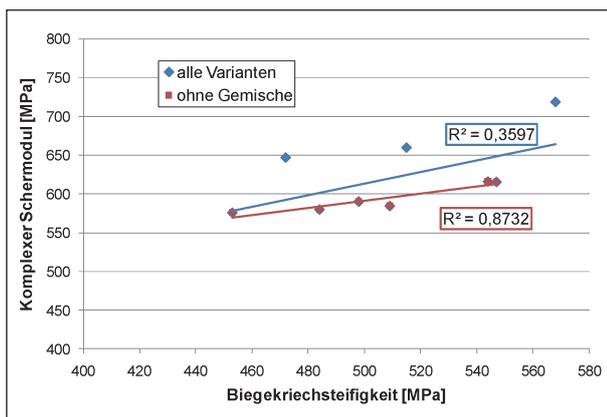


Bild 71: Korrelation der Biegekriechsteifigkeit bei -5 °C und dem komplexen Schermodul bei 0 °C (Mischungsverhältnis F/B = 70/30)

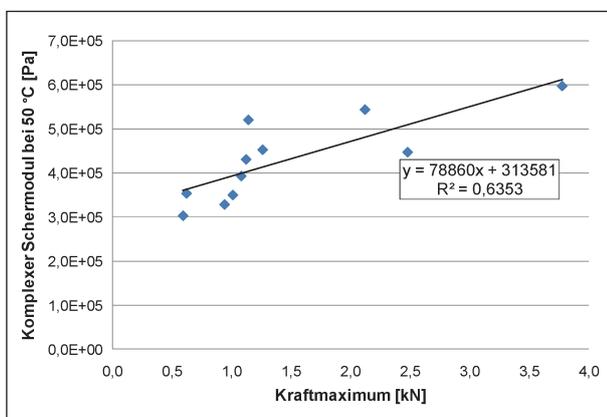


Bild 72: Korrelation zwischen Kraftmaximum und komplexem Schermodul der Mörtel auf Basis des Bitumen 30/45 (Mischungsverhältnis F/B = 70/30, Messtemperatur 50 °C)

diesen Messverfahren bislang ebenfalls nicht geklärt werden kann, welches Ergebnisse brauchbare Rückschlüsse auf das Praxisverhalten zulässt, werden im Folgenden für die Beurteilung der Verformungsbeständigkeit bei hohen Gebrauchstemperaturen beiden Kriterien berücksichtigt (siehe Kapitel 6.2.5).

6.2.5 Allgemeine Bewertung der untersuchten Füller

Im Folgenden werden die acht näher betrachteten Füller bzw. Füllergemisch bezüglich der Einflüsse auf die Mörtel Eigenschaften vergleichend bewertet. Da die Beurteilung weitestgehend unabhängig von den Basisbitumen ist (vgl. Kapitel 6.2.2 bis Kapitel 6.2.4), werden dazu lediglich die Mörtel auf Basis des Bitumens 30/45 herangezogen.

Zur Bewertung werden je Kriterium Punkte vergeben. Der Mörtel mit den schlechtesten Eigenschaften erhält dabei 0 Punkte, während dem besten zehn Punkte zugeschrieben werden. Die Bewertung der übrigen Mörtel erfolgt mit einer linearen Interpolation zwischen den beiden Extremen.

Kälteverhalten

Da die Bewertung des Kälteverhaltens mittels BBR und DSR Unterschiede aufwies (vgl. Kapitel 6.2.4), wird neben der Biegekriechsteifigkeit und dem m-Wert auch der komplexe Schermodul bei 0 °C berücksichtigt. Dabei werden bezüglich Biegekriechsteifigkeit und komplexem Schermodul geringe und bezüglich m-Wert große Messwerte als positiv beurteilt (vgl. Kapitel 3.3.3).

Die Variante KK30 weist bezüglich aller Kriterien das rissanfälligste Materialverhalten auf und wird folglich mit 0 Punkten bewertet (Bild 73). Da unter Verwendung von Schiefermehl keine normgerechten Balken herzustellen waren, werden die BBR Messungen des SB30 ebenfalls mit 0 bewertet. Die Gemische aus Schiefermehl und Kalkstein (4,6 Punkte) und insbesondere aus Microsilica und Kalkstein (5,6 Punkte) weisen dagegen deutlich bessere Kälteeigenschaften auf. Sie werden aufgrund der BBR-Ergebnisse auch als weniger rissanfällig bewertet als der Kalksteinfüller KBe (3,5 Punkte). Die übrigen Kalksteine weisen dagegen im Vergleich mit 8,2 (KH30) bis 8,7 Punkten (KF30) die besten Kälteeigenschaften auf.

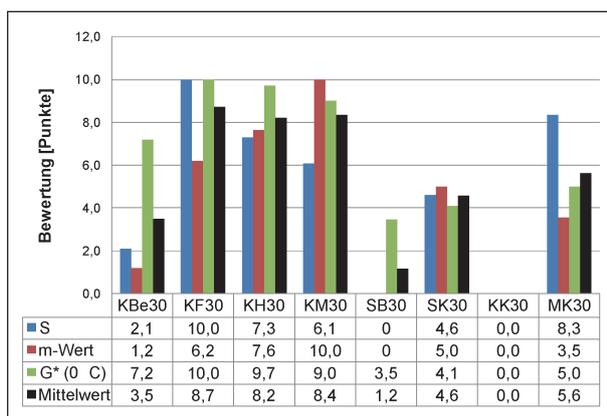


Bild 73: Bewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Kälteverhalten der Mörtel

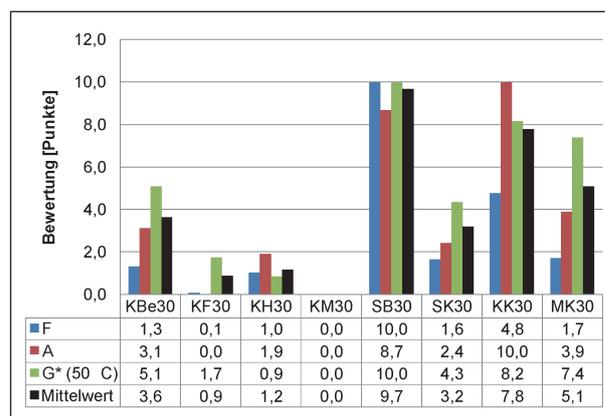


Bild 74: Bewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Wärmeverhalten der Mörtel

Wärmeeigenschaften

Die Wärmeeigenschaften wurden im Bereich hoher Gebrauchstemperaturen (50 °C) bewertet. Dabei wurden das Kraftmaximum und die Formänderungsarbeit, die mittels Kraft-Duktilitäts-Prüfung bestimmt wurden, und der komplexe Schermodul bei 50 °C berücksichtigt (Bild 74). Die Aussagekraft beider Messverfahren wird als gleich angesehen. Da jedoch zwei Kriterien aus der Kraft-Duktilitäts-Prüfung und nur eins aus der DSR-Messung berücksichtigt werden, gehen die komplexen Schermoduln mit dem Faktor zwei in die Mittelwertbildung ein.

Die Verformungsbeständigkeit der Kalksteinfüller ist – im Gegensatz zu dem positiven Kälteverhalten – als gering zu bewerten. Dies gilt insbesondere für die Variante KM30, die bezüglich aller drei Kriterien die geringsten Werte aufweist. Einzige Ausnahme in der Gruppe der Kalksteinfüller ist die Variante KBe30, die mit 3,6 Punkten eine deutlich größere Verformungsbeständigkeit bei hohen Gebrauchstemperaturen aufweist. Alle Zusätze bewirken eine deutliche Erhöhung der Wärmestandfestigkeit. Dabei ist die Variante SK30 als verformungsanfälliger zu bewerten als der reine Kalkstein aus Bernburg (KBe30). Die Zugabe des Microsilica führt dagegen zu einer Erhöhung der Verformungsbeständigkeit (5,1 Punkte) während das Gemisch aus Kalkstein und Kalkhydrat (KK30) mit 7,8 Punkten annähernd so steif ist, wie das reine Schiefermehl (SB30, 9,7 Punkte).

Einbauverhalten

Zur Beurteilung des Einbauverhaltens wurden die komplexen Schermoduln bei 160, 180 und 200 °C betrachtet (Bild 75). Dadurch sollen die Unsicher-

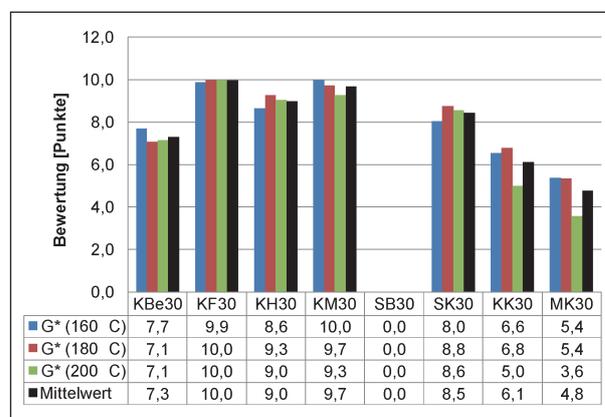


Bild 75: Bewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Einbauverhalten der Mörtel

heiten minimiert werden, die durch die Streuung der Messwerte bei diesen hohen Temperaturen entstehen. So ist neben der qualitativen Beschreibung des Einbauverhaltens in Kapitel 6.2.4 auch eine abgesicherte quantitative Bewertung des Einbauverhaltens möglich.

Die versteifende Wirkung der Kalksteinfüller ist in dem durchgeführten Vergleich am geringsten. Daher werden die Mörtel KF30 (10,0 Punkte) und KM30 (9,7 Punkte) am besten bewertet. Der Füller aus Hehlen ist ebenfalls als gleichwertig zu beurteilen, da er in Verbindung mit dem Bitumen 20/30 einen wesentlich geringeren Verarbeitungswiderstand aufwies. Der Kalkstein aus Bernburg (KBe30) ist dagegen deutlich steifer (7,3 Punkte). Demgegenüber weist die aus Kalkstein und Schiefermehl zusammengesetzte Variante SK30 einen geringeren Einbauwiderstand auf (8,5 Punkte). Die übrigen Zusätze bewirken jedoch eine deutliche Versteifung. So ist die Verarbeitbarkeit bei Zugabe von Kalkhydrat (6,1 Punkte) noch als mittelmäßig zu be-

werten, während die Variante MK30 (4,8 Punkte) im Vergleich mit den anderen Mörteln bereits steif ist. Der Einbauwiderstand des Schiefermehls ist nochmals deutlich höher als bei allen anderen Varianten.

Zusammenfassung

In Bild 76 sind das Kälte-, Wärme- und Einbauverhalten der untersuchten Mörtel zusammengefasst.

Die drei Kalksteinfüller aus Flanderbach, Hehlen und Medenbach, die alle aufgrund der positiven Erfahrungen im Gussasphalt ausgewählt wurden, sind weitestgehend gleich zu beurteilen. Bezüglich Kälte- und Einbauverhalten sind die Unterschiede zu vernachlässigen. Lediglich die abweichenden Bewertungen bei hohen Gebrauchstemperaturen können positiv auf die Gussasphalteeigenschaften wirken.

Der Kalkstein aus Bernburg weist in allen Temperaturbereichen abweichende Eigenschaften auf. Neben dem schlechteren Kälteverhalten sind für dieses Forschungsprojekt vor allem die Übertragbarkeit der abweichenden Wärme- und Einbaueigenschaften auf den Gussasphalt zu überprüfen. Daher wurden die Auswirkungen der Füller KF und KBe an gemischten Gussasphalten untersucht.

Die Wirkung des Schiefermehls ist jener der Kalksteinfüller genau entgegengesetzt. Bei großer Rissanfälligkeit und hohem Einbauwiderstand weist der Mörtel SB30 eine hohe Verformungsbeständigkeit auf. Daher wurde die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften auf den Gussasphalt überprüft. Zur Herstellung gebrauchstauglicher Gussasphalte mit Schiefermehl ist jedoch die Zugabemenge des Füllers entsprechend seiner stärker versteifenden Wirkung zu reduzieren.

Durch die Zugabe von 25 M.-% Schiefermehl zu dem Kalksteinfüller entsteht ein Gemisch dessen Eigenschaften mit der Variante KBe30 vergleichbar sind. Insgesamt wird die Variante SK30 jedoch etwas besser bewertet, da die Verformungsbeständigkeit etwas geringer, der Einbauwiderstand jedoch deutlich niedriger ist als bei der Variante KBe30. Daher wurde die Eignung des Schiefermehls als Zusatz in Gussasphaltgemischen untersucht.

Der Zusatz von Kalkhydrat bewirkt trotz deutlicher Versteifung im hohen Gebrauchstemperaturbereich nur eine relativ geringe Erhöhung des Einbauwiderstands. Dagegen ist das Kälteverhalten als negativ

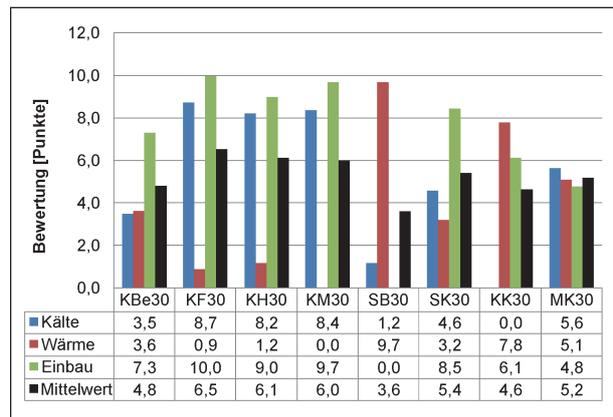


Bild 76: Gesamtbewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Mörtelverhalten

zu beurteilen. Da die Optimierung innerhalb dieses Forschungsprojektes primär das Verarbeitungs- und Verformungsverhalten betrifft, wurde die Zugabe von Kalkhydrat an Gussasphaltgemischen untersucht. Außerdem gilt Gussasphalt im Straßenbau als eher nicht kritisch im Kälteverhalten.

Die Variante MK30 weist bezüglich aller Kriterien ein mittelmäßiges Verhalten auf. Da somit – im Gegensatz zu dem Kalkhydrat – durch den Zusatz von Microsilica keine entscheidenden Verbesserung der Gussasphalteeigenschaften zu erwarten ist, wurde diese Variante nicht weiter untersucht.

6.2.6 Eignung der Füller für Gussasphalt

Die Verwendung von Schiefermehl in der gleichen Zugabemenge wie der Kalksteinfüller versteift den Gussasphalt bereits bei dessen Herstellung derart, dass kein fließfähiger Gussasphalt entsteht (siehe Bild 44). Eine praxistaugliche Verarbeitung ist erst durch eine Reduzierung des Füllergehalts von ursprünglich 26 auf 12 M.-% möglich. Mit diesem Füllergehalt ist der Gussasphalt gut zu verarbeiten (Bild 45); er weist jedoch eine geringe Verformungsbeständigkeit auf. Zudem ist aufgrund des geringen Mörtelgehalts keine gute Homogenität und keine hohlraumfreie Zusammensetzung mehr gewährleistet. Diese Nachteile stärker versteifender Füller, die bei der Verwendung von Zusätzen wie Kalkhydrat ebenfalls eintreten, zeigt bereits die Verwendung des Kalksteinfüllers aus Bernburg (KBe). Bei einem höheren Verarbeitungswiderstand entsteht ein Gussasphalt, der eine höhere statische Stempeldringtiefe aufweist als der Gussasphalt unter Verwendung des wenig versteifenden Kalksteinfüllers aus Flandersbach (KF).

Die Verwendung von Kalksteinfüllern mit einer geringen versteifenden Wirkung in einem hohen Zugabeanteil ermöglicht die Herstellung von homogenem, dichtem und gut zu verarbeitendem Gussasphalt, der aufgrund dieser Eigenschaften auch eine hohe Verformungsbeständigkeit aufweist. Bei der Verwendung stärker versteifender Komponenten, die zur Verarbeitung stets eine Reduzierung des Füllergehalts erfordern, entstehen dagegen weniger homogene und damit auch weniger verformungsbeständige Gussasphalte.

6.3 Eigenschaften und Einflüsse feiner Gesteinskörnungen

6.3.1 Systematische Zusammenhänge zwischen Fließkoeffizient und Gussasphalteigenschaften

In Bild 77 sind die Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen den minimalen Einbautemperaturen der zugehörigen Gussasphaltvarianten gegen-

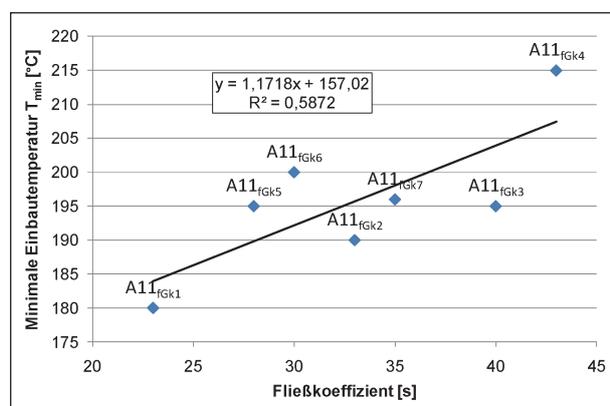


Bild 77: Zusammenhang zwischen minimaler Einbautemperatur und Fließkoeffizient der Varianten A11_{fgk1} bis A11_{fgk8}

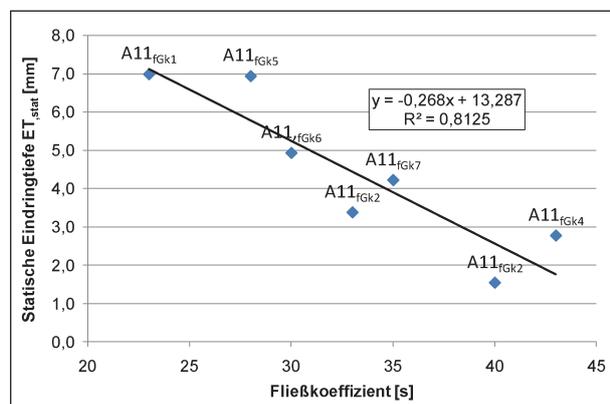


Bild 78: Zusammenhang zwischen statischer Eindringtiefe und Fließkoeffizient der Varianten A11_{fgk1} bis A11_{fgk8}

übergestellt. Grundsätzlich steigen die Verarbeitungswiderstände bei einer Erhöhung des Fließkoeffizienten an. Allerdings gilt dieser Zusammenhang primär für die beiden feinen Gesteinskörnungen mit den extremen Fließkoeffizienten. Die minimalen Einbautemperaturen der übrigen Varianten sind trotz einer Spanne der Fließkoeffizienten von 12 s nahezu identisch. Bei Verwendung nur einer feinen Gesteinskörnung ist jedoch die Rangfolge der Fließkoeffizienten mit der Rangfolge der minimalen Einbautemperaturen identisch.

Zwischen den Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen und der statischen Stempeldringtiefe der Gussasphalte ist eine Korrelation gegeben (Bild 78). Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8125 besteht dabei ein linearer Zusammenhang.

6.3.2 Bewertung der untersuchten feinen Gesteinskörnungen

Um einen systematischen Zusammenhang zwischen den Fließkoeffizienten feiner Gesteinskörnungen und den Auswirkungen auf die Gussasphalteigenschaften abzuleiten, wurden vier Materialien mit deutlich abweichenden Fließkoeffizienten ausgewählt. Zudem wurden vier Gemische aus jeweils 50 M.-% einer gebrochenen und 50 M.-% einer rundkörnigen Gesteinskörnung untersucht. Dazu wurden sowohl zwei rundkörnige als auch zwei gebrochene Materialien mit deutlich abweichenden Fließkoeffizienten ausgewählt.

In Bild 79 sind die Eindringtiefen und die aus den Rührwiderstandsmomenten abgeleiteten minimalen Einbautemperaturen der Gussasphalte sowie die Fließkoeffizienten der verwendeten feinen Gesteinskörnungen zusammengefasst.

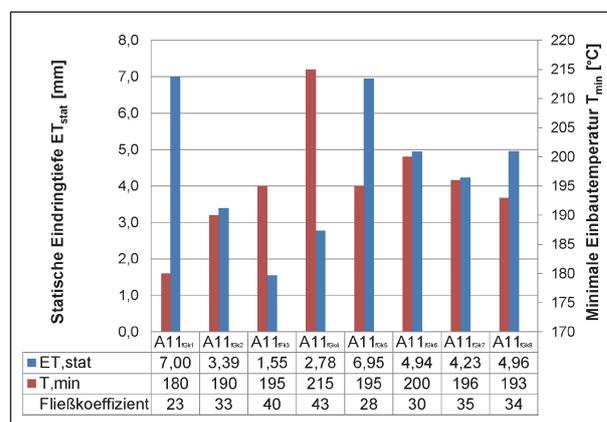


Bild 79: Statische Eindringtiefe, minimale Einbautemperatur und Fließkoeffizient der Varianten A11_{fgk1} bis A11_{fgk8}

Die Gussasphalte unter Verwendung der feinen Gesteinskörnung mit dem niedrigsten Fließkoeffizienten von 23 s (NH) weisen eine sehr geringe Verformungsbeständigkeit auf. Dies gilt sowohl bei der ausschließlichen Verwendung als auch in den Gemischen mit den gebrochenen feinen Gesteinskörnungen ($A11_{fGk5}$ und $A11_{fGk6}$). Dabei ist der Gussasphalt bei ausschließlicher Verwendung des NH sehr gut zu verarbeiten (minimale Einbautemperatur < 180 °C), während das Einbauverhalten der Varianten $A11_{fGk5}$ und $A11_{fGk6}$ etwa dem der verformungsbeständigeren Varianten $A11_{fGk7}$ und $A11_{fGk6}$ entspricht. Feine Gesteinskörnungen mit sehr niedrigen Fließkoeffizienten sind folglich aufgrund des negativen Einflusses auf die Verformungsbeständigkeit zu vermeiden.

Die Verwendung der feinen Gesteinskörnung mit dem höchsten Fließkoeffizienten von 43 s (GG) bewirkt eine deutliche Erhöhung des Einbauwiderstandes. Allerdings weisen die Varianten $A11_{fGk4}$ (ausschließlich GG) und $A11_{fGk6}$ (50 M.-% GG) trotz der höchsten minimalen Einbautemperaturen keine adäquate Steifigkeit im hohen Gebrauchstemperaturbereich auf ($ET_{stat} = 2,78$ mm bei $A11_{fGk4}$ bzw. 4,94 bei $A11_{fGk6}$). Somit ist der Einsatz feiner Gesteinskörnungen mit sehr hohen Fließkoeffizienten ebenfalls zu vermeiden. Dabei ist bezüglich der Verformungsbeständigkeit noch der Einfluss der geringen Mischguttemperatur bei der Probekörperherstellung zu untersuchen.

Feine Gesteinskörnungen mit Fließkoeffizienten im mittleren Bereich (etwa von 25 bis 40 s) bewirken dagegen ein ausgewogenes Materialverhalten. Bild 80 verdeutlicht, dass vor allem die beiden Varianten $A11_{fGk2}$ (100 M.-% AH) und $A11_{fGk6}$ (100 M.-% GBe) sowohl eine geringe Einbautemperatur als auch

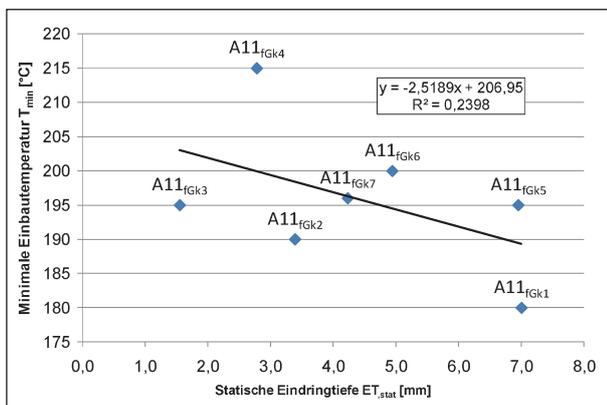


Bild 80: Zusammenhang zwischen statischer Eindringtiefe und minimaler Einbautemperatur der Varianten $A11_{fGk1}$ bis $A11_{fGk8}$

eine ausreichende ($A11_{fGk2}$) bzw. hohe ($A11_{fGk3}$) Verformungsbeständigkeit aufweisen.

Des Weiteren haben die Untersuchungen ergeben, dass bei Gemischen verschiedener feiner Gesteinskörnungen die jeweiligen negativen Einflüsse der beiden Komponenten dominant sind. So ist beispielsweise bei der Varianten $A11_{fGk5}$ die geringe Verformungsbeständigkeit des $A11_{fGk1}$ (NH) und der hohe Einbauwiderstand des $A11_{fGk3}$ (GBe) festzustellen. Folglich sind die Asphalteigenschaften durch die Verwendung einer feinen Gesteinskörnung mit einem mittleren Fließkoeffizienten (ca. 35 s) zu optimieren.

6.4 Eigenschaften und Einflüsse feiner Gesteinskörnungen

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.3.1 besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Bindemittelüberschuss und dem Materialverhalten des Gussasphalts. Demnach wird die Verarbeitbarkeit mit Zunahme des Bindemittelüberschusses verbessert. Da der Bindemittelüberschuss wiederum maßgeblich durch den Hohlraumgehalt des Korngerüsts beeinflusst wird, ist in Bild 81 der Zusammenhang zwischen den mittels Rüttelversuch bestimmten Hohlraumgehalten ausgewählter Basis-Gussasphalte und deren minimaler Einbautemperatur dargestellt.

Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,0919 besteht bei den untersuchten Varianten offensichtlich kein Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und minimaler Einbautemperatur oder es existieren andere, stark beeinflussende Faktoren.

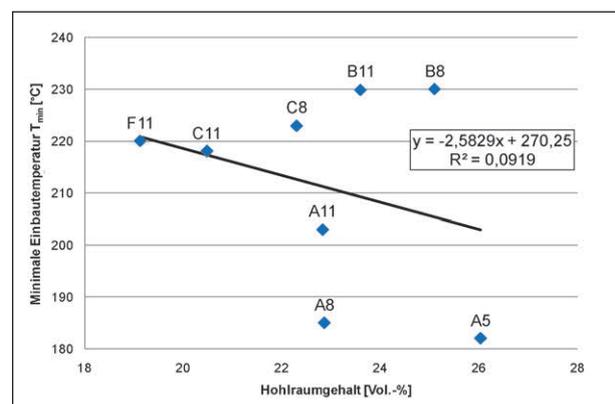


Bild 81: Korrelation zwischen Hohlraumgehalt und minimaler Einbautemperatur ausgewählter Basis-Gussasphalte

Neben den untersuchten feinen und groben Gesteinskörnungen unterscheiden sich die Basis-Gussasphalte durch verschiedene Füller- und Bindemittelgehalte. Folglich wird der Bindemittelüberschuss auch durch das Volumen dieser Komponenten beeinflusst. In Bild 83 sind daher die Mörtelüberschüsse dargestellt, die sich rechnerisch nach dem Füllen des Hohlraumgehaltes der feinen und groben Gesteinskörnungen mit dem Volumen des Asphaltmörtels ergeben (Bild 82).

In Bild 83 ist ein Anstieg des Verarbeitungswiderstandes bei einer Erhöhung des Mörtelüberschusses dargestellt. Dieses Materialverhalten steht jedoch im Widerspruch zu den in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Eigenschaften von Gussasphalt. Folglich ist die Bestimmung der Rütteldichte unter Verwendung aller feinen und groben Gesteinskörnungen zur Charakterisierung der Gussasphalteeigenschaften offensichtlich ungeeignet.

Die sehr feinen Anteile des Gesteinskörnungsgemischs beeinflussen die Rütteldichte sowohl durch ihren Einfluss auf die Verdichtbarkeit als auch durch

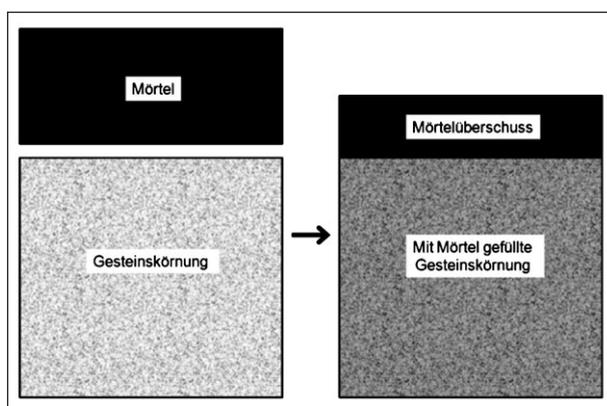


Bild 82: Schematische Darstellung des berechneten Mörtelüberschusses

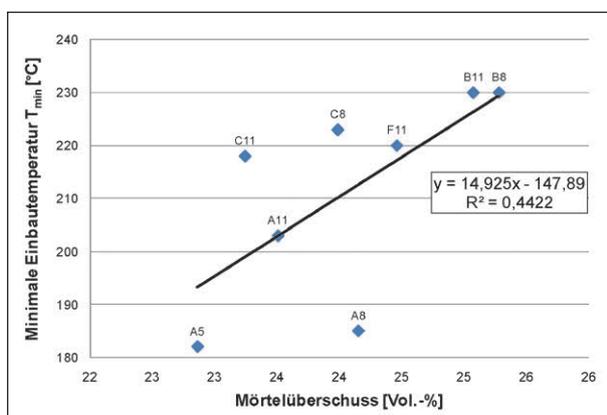


Bild 83: Korrelation zwischen Mörtelüberschuss und minimaler Einbautemperatur ausgewählter Basis-Gussasphalte

die Füllung der Hohlräume. Daher wurde mit den Varianten A11_{gGk1} bis A11_{gGk4} die Hohlraumgehalte von vier Gesteinskörnungsgemischen bestimmt, deren Kornanteil unter 0,5 mm zuvor abgesiebt wurde.

Die Hohlraumgehalte der Varianten A11_{gGk3} und A11_{gGk4} sind gemäß Bild 81 mit 22,8 bzw. 22,6 Vol.-% nahezu identisch. Deren feine Gesteinskörnungen wurden identisch gewählt, während die Zusammensetzungen der groben Gesteinskörnungen signifikante Unterschiede aufweisen. Folglich ist der Einfluss der groben Gesteinskörnungen auf die ermittelte Rütteldichte sehr gering.

Deutliche Unterschiede bestehen dagegen zwischen den Hohlraumgehalten der Varianten A11_{gGk1} bis A11_{gGk3}. Bei identischer grober Gesteinskörnung verursachen folglich die unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen abweichende Lagerungsdichten. Dabei ist der größere Hohlraumgehalt der Variante A11_{gGk2}, deren feine Gesteinskörnung ausschließlich aus gebrochenem Korn besteht, gegenüber der Variante A11_{gGk3} (je 50 M.-% gebrochene und runde Gesteinskörnung) mit dem höheren Reibungswiderstand zu erklären. Diese Begründung für die Entstehung unterschiedlicher Hohlraumgehalte widerspricht jedoch dem Materialverhalten der Variante A11_{gGk1}, deren Hohlraumgehalt trotz ausschließlicher Verwendung rundkörniger feiner Gesteinskörnung sehr hoch ist.

Da die Hohlraumgehalte maßgeblich durch die feinen Gesteinskörnungen beeinflusst werden, ist die Bestimmung der Rütteldichte zur Beurteilung der groben Gesteinskörnungen in der durchgeführten Weise nicht geeignet.

7 Praxiserprobung

7.1 Gussasphalt-Rezepturen ohne viskositätsverändernde Zusätze

Zur Praxiserprobung wurden insgesamt elf Gussasphalt-Varianten (zwei MA 5 S, sechs MA 8 S und vier MA 11 S) von sieben verschiedenen Mischwerken ausgewählt.

7.1.1 Ausgewählte Gussasphalt-Rezepturen

Als Bindemittel wurden ausschließlich Straßenbau-bitumen ohne Zusätze (weder Polymere noch vis-

kositätsverändernde Zusätze) eingesetzt. Diese stammen stets von dem Bindemittelhersteller von dem das jeweilige Mischwerk die Bindemittel zur Gussasphaltherstellung üblicherweise bezieht. Entsprechend den Empfehlungen der ZTV Asphalt-StB 07 für Gussasphalte auf normal bis schwer beanspruchten Straßen (Bauklasse SV bis III bzw. Belastungsklasse Bk100 bis Bk3,2) wurden mit einer Ausnahme Straßenbaubitumen 20/30 verwendet. Einzig bei dem MA 5 S des Mischwerks Duisburg wurde ein Bitumen 30/45 eingesetzt, da bei relativ geringen Anforderungen an die Verformungsbeständigkeit eine sehr gute Verarbeitbarkeit im Handeinbau sichergestellt werden musste. Die Bindemittelgehalte der zehn Gussasphalte variieren zwischen 6,7 und 7,6 M.-%, womit die Rezepturen trotz relativ ähnlicher Korngrößenverteilungen (siehe Bilder 84 bis 86) einen deutlich unterschiedlichen Bin-

demittelbedarf aufweisen (Tabelle 17). Unter Einbeziehung der Gesteinskörnungsdichte entsprechen

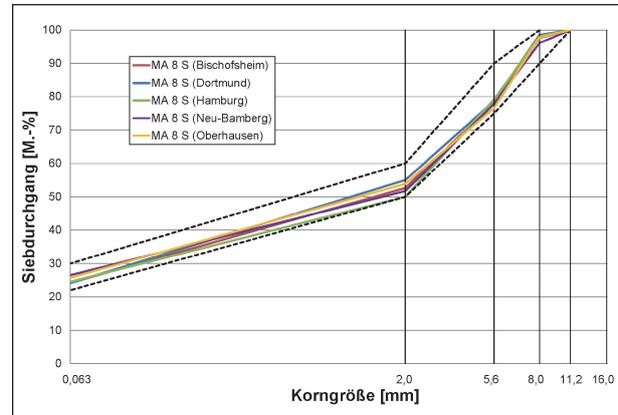


Bild 85: Korngrößenverteilungen der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S

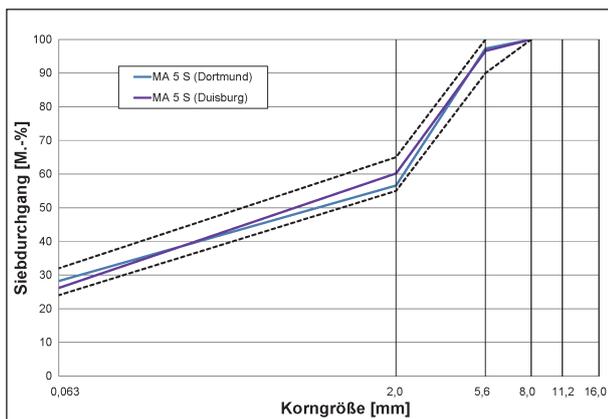


Bild 84: Korngrößenverteilungen der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S

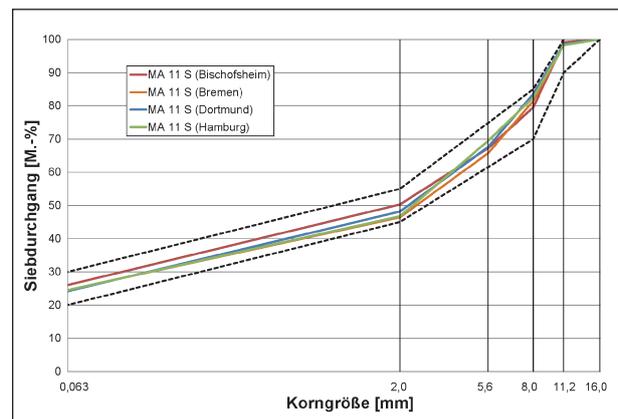


Bild 86: Korngrößenverteilungen der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S

Gussasphalt-variante												
	MA 5 S (Duisburg)	MA 5 S (Dortmund)	MA 8 S (Bischofsheim)	MA 8 S (Dortmund)	MA 8 S (Hamburg)	MA 8 S (Neu-Bamberg)	MA 8 S (Oberhausen)	MA 11 S (Bischofsheim)	MA 11 S (Bremen)	MA 11 S (Dortmund)	MA 11 S (Hamburg)	
< 0,063	26,1	26,1	24,1	24,1	24,5	26,5	25,7	26,0	25,5	24,2	24,5	
< 2,0	60,2	60,2	52,6	55,0	50,0	51,7	53,9	50,3	46,4	48,2	46,7	
< 5,6	96,6	96,5	78,1	78,7	79,2	77,8	76,6	67,2	65,7	67,6	69,4	
< 8,0	100	100	97,6	98,5	98,1	96,1	97,8	79,5	81,4	83,5	82,5	
< 11,2	100	100	100	100	100	100	100	99,1	98,3	98,5	98,3	
< 16,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Anteil der fGk mit E _{CS35}	50	80	48	50	40	50	100	79	53	100	40	
Bindemittelsorte	30/45	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	
Bindemittelgehalt	7,5	7,6	7,0	7,5	7,2	7,2	7,2	6,7	7,5	7,4	7,0	

Tab. 17: Zusammensetzung der optimierten Gussasphalte

alle Bindemittelgehalte den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07.

Als Gesteinskörnungen wurden ebenfalls die in den jeweiligen Mischwerken für die Herstellung von Gussasphalt üblicherweise verwendeten Materialien eingesetzt. Als feine und grobe Gesteinskörnungen wurden Anorthosit, Diabas, Granodiorit, Grauwacke, Granit, Moräne und Rhyolith verwendet, während als Füller ausschließlich Kalkstein eingesetzt wurde. Der Anteil der gebrochenen feinen Gesteinskörnungen (E_{CS35}) weist mit 40 bis 100 M.-% deutliche Unterschiede auf.

7.1.2 Eigenschaften der ausgewählten Gussasphalt-Varianten

Vor der Praxiserprobung wurden im Labor das Verarbeitungs- und das Verformungsverhalten der Gussasphalte erprobt.

Die Verarbeitbarkeit wurde anhand des Rührwiderstandes gemäß Kapitel 5.2 (maximales Rührwider-

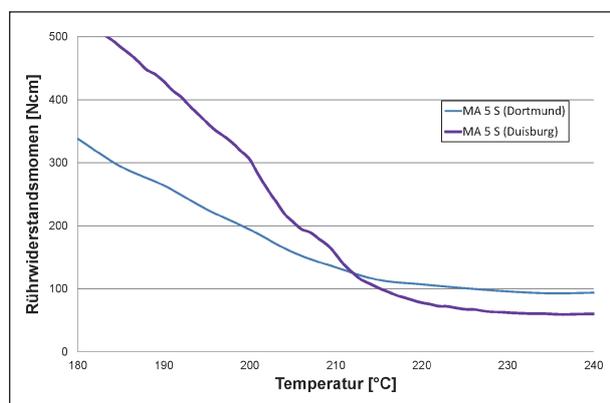


Bild 87: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S

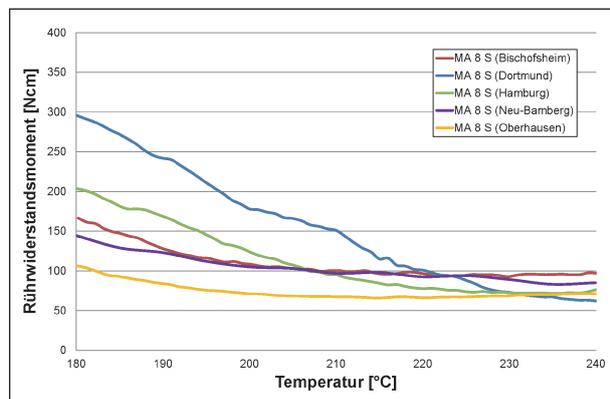


Bild 88: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S

standsmoment für eine gute Verarbeitbarkeit: 100 Ncm) bewertet. Zur Dokumentation der Eignung der gewählten Varianten sind in den Bildern 87 bis 89 die temperaturabhängigen Rührwiderstandsmomente und in Tabelle 18 die minimalen Einbautemperaturen zusammengefasst.

Zur Beurteilung der Verformungsbeständigkeit wurden die statische und die dynamische Stempel Eindringtiefe bestimmt. In den Bildern 90 bis 92 sind die zeitabhängigen statischen Eindringtiefen der Gussasphalt-Varianten getrennt nach der Asphaltart abgebildet, während in den Bildern 93 bis 95 die dynamischen Eindringtiefen jeweils in Abhängigkeit von dem Lastzyklus dargestellt sind.

In Tabelle 19 sind die statischen Eindringtiefen nach 30 Minuten und die Zunahmen der statischen Eindringtiefen nach weiteren 30 Minuten inklusive der dazugehörigen Grenzwerte der TL Asphalt-StB

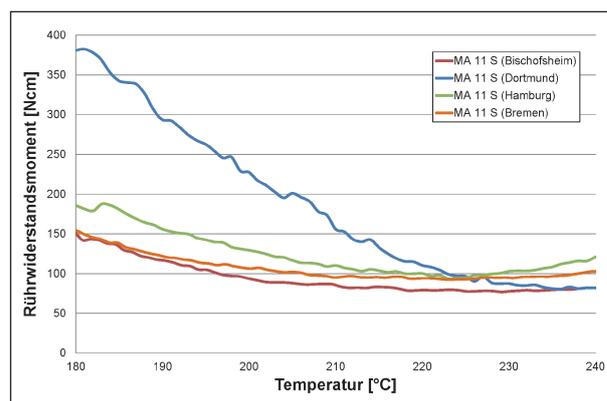


Bild 89: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S

Variante [-]	Minimale Einbautemperatur [°C]
MA 5 S (Duisburg)	215
MA 5 S (Dortmund)	227
MA 8 S (Bischofsheim)	214
MA 8 S (Dortmund)	220
MA 8 S (Hamburg)	207
MA 8 S (Neu-Bamberg)	208
MA 8 S (Oberhausen)	183
MA 11 S (Bischofsheim)	197
MA 11 S (Bremen)	206
MA 11 S (Dortmund)	223
MA 11 S (Hamburg)	223

Tab. 18: Minimale Einbautemperatur laut Rührwiderstandsmessung der optimierten Gussasphalte

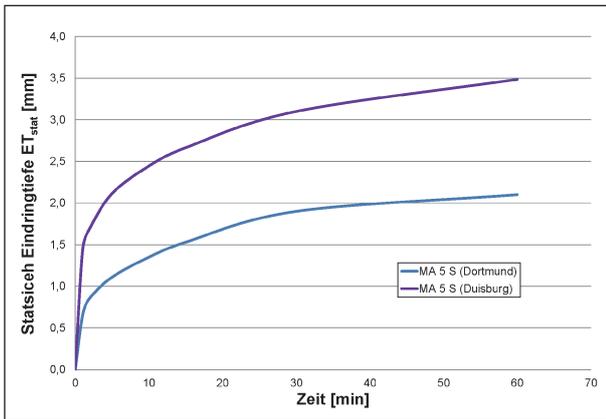


Bild 90: Zeitabhängige statische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S

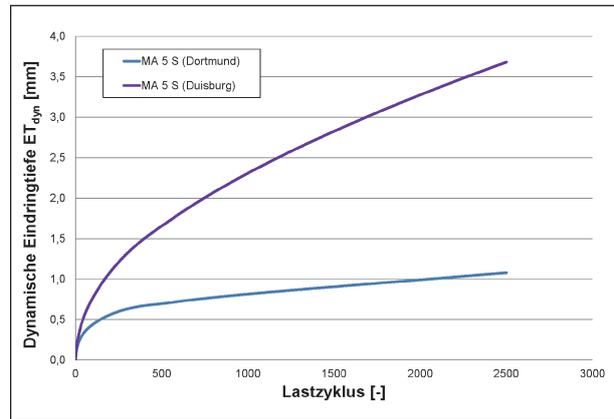


Bild 93: Lastzyklusabhängige dynamische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S

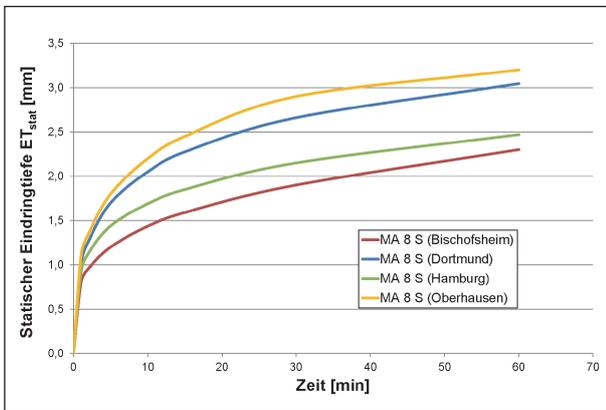


Bild 91: Zeitabhängige statische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S

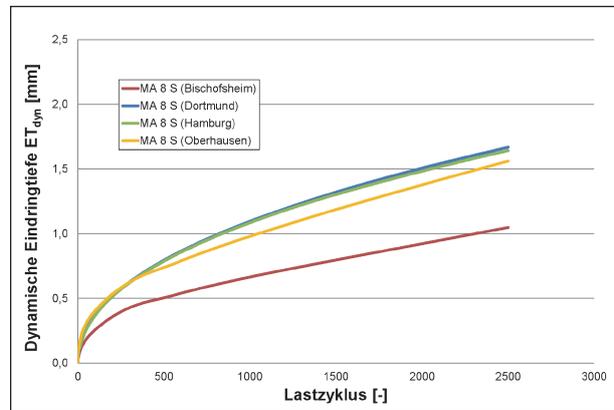


Bild 94: Lastzyklusabhängige dynamische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S

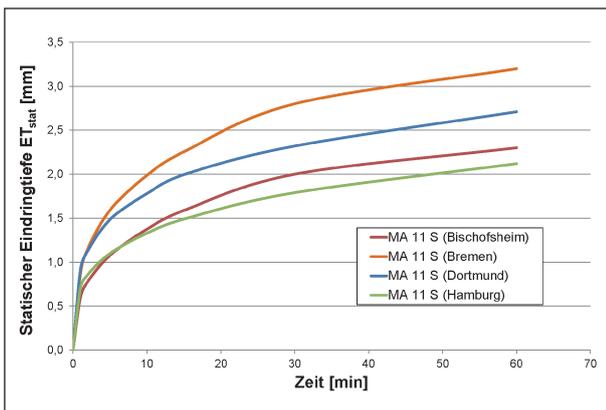


Bild 92: Zeitabhängige statische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S

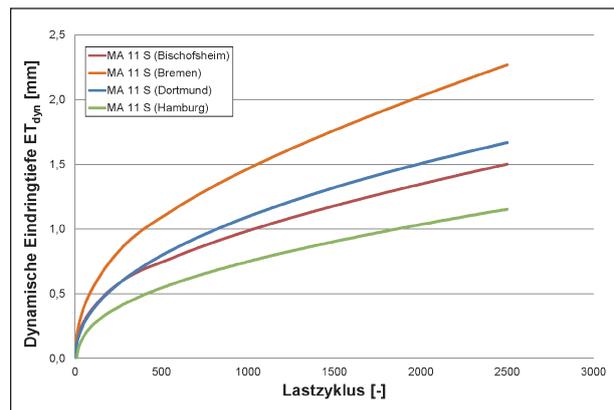


Bild 95: Lastzyklusabhängige dynamische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S

07 zusammengefasst. Ergänzt wird Tabelle 19 durch die nach TL Asphalt-StB 07 anzugebenden dynamischen Eindringtiefen nach 2.500 Lastzyklen.

Alle Gussasphalt-Varianten sind nach den Ergebnissen der Laboruntersuchungen bei einer Temperatur von maximal 230 °C zu verarbeiten.

Auffällig ist das temperaturunabhängig sehr niedrige Rührwiderstandsmoment des MA 8 S des Mischwerks Oberhausen, da dessen Zusammensetzung einen durchschnittlichen Bindemittelgehalt von 7,2 M.-%, eine mittlere Korngrößenverteilung und ausschließlich gebrochene feine Gesteinskörnung aufweist. Neben dem niedrigen Verarbeitungswiderstand, der den Einbau bereits deutlich unterhalb

Variante [-]	ET _{stat, 30}		ET _{stat, Δ30-60}		ET _{dyn, 2500}
	Messwert [mm]	Grenzwert [mm]	Messwert [mm]	Grenzwert [mm]	Messwert [mm]
MA 5 S (Dortmund)	1,9	1,0 – 3,0	0,2	≤ 0,4	1,1
MA 5 S (Duisburg)	3,1	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	3,7
MA 8 S (Bischofsheim)	1,9	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	1,0
MA 8 S (Dortmund)	2,7	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	1,7
MA 8 S (Hamburg)	2,2	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,7
MA 8 S (Neu-Bamberg)	2,3	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	0,3
MA 8 S (Oberhausen)	2,9	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,6
MA 11 S (Bischofsheim)	2,0	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,5
MA 11 S (Bremen)	2,8	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	2,3
MA 11 S (Dortmund)	2,3	1,0 – 3,0	0,4	≤ 0,4	1,7
MA 11 S (Hamburg)	1,8	1,0 – 3,0	0,3	≤ 0,4	1,2

Tab. 19: Zusammenfassung der stat. und dyn. Stempeleindringversuche der optimierten Gussasphalte

von 200 °C ermöglicht, ist der Verformungswiderstand dieses Gussasphalts relativ gering. Mit 2,9 mm nach 30 Minuten weist diese Variante die größte statische Eindringtiefe aller MA 8 S auf. Die Zunahme in den folgenden 30 Minuten des statischen Stempeleindringversuchs von 0,3 mm und die dynamische Eindringtiefe von 1,6 mm sind dagegen durchschnittliche Messergebnisse.

Nur unwesentlich geringere statische Eindringtiefen weisen der MA 8 S aus Dortmund und der MA 11 S aus Bremen auf, wobei letztgenannter mit 2,3 mm auch weniger Verformungsbeständigkeit im dynamischen Stempeleindringversuch aufweist. Der MA 8 S aus Dortmund wurde mit einem Bindemittelgehalt von 7,5 M.-% und einem Anteil von 50 M.-% gebrochenem Korn an der feinen Gesteinskörnung explizit für eine gute Verarbeitbarkeit im Handeinbau konzipiert (siehe Kapitel 7.2).

Der MA 5 S aus Duisburg wurde ebenfalls für den Handeinbau bei zudem geringen Anforderungen an die Verformungsbeständigkeit entwickelt. Daher wurde die geringe, mit einer Überschreitung der maximal zulässigen statischen Eindringtiefe um 0,1 mm verbundene Verformungsbeständigkeit toleriert. Mit 3,7 mm weist diese Variante darüber hinaus die bei weitem größte dynamische Eindringtiefe auf. Da neben der statischen Eindringtiefe auch Bindemittelgehalt und -sorte den Anforderungen an einen MA 5 N entsprechen, handelt es sich bei dieser Variante formal um einen solchen.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Varianten zeigen der MA 5 S aus Dortmund, der MA 8 S aus

Bischofsheim und der MA 11 S aus Hamburg das verformungsbeständigste Verhalten. Mit statischen Eindringtiefen von 1,8 bzw. 1,9 mm nach 30 Minuten und dynamischen Eindringtiefen von 1,0 bis 1,2 mm nach 2.500 Lastzyklen weisen diese die niedrigsten Kennwerte auf. Insbesondere der MA 5 S aus Dortmund zeigt zudem im statischen (0,2 mm Zunahme während der zweiten 30 Minuten) und im dynamischen Stempeleindringversuch einen sehr geringen Anstieg der Deformationen bei andauernder Belastung. Die Verarbeitung bei maximal 230 °C ist anhand der Laborergebnisse bei diesen Varianten dennoch zu erwarten.

7.2 Erprobungen in situ

Am 28. Juni 2012 wurde auf dem Lehrhof des Berufsförderwerkes der Bauindustrie NRW e. V. in Essen eine Testfläche von etwa 40 m² mit Gussasphalt MA 5 S ohne viskositätsverändernde Zusätze angelegt. An dem Tag der Messung war es trocken und sonnig; die Lufttemperatur betrug 25 °C und die Luftfeuchtigkeit ca. 59 %. Der Asphalt wurde von dem Mischwerk in Duisburg hergestellt und mit einer Temperatur von etwa 220 °C angeliefert. Der Einbau von Hand war mit relativ geringem Arbeitsaufwand durchzuführen. Die Messdauer zur Bestimmung der Dämpfe und Aerosole betrug etwa 100 Minuten.

Auf dem Gelände der Zeche Zollverein in Essen wurde am 2. August 2012 ein Gussasphalt MA 8 S des Mischwerks Dortmund verarbeitet (Bild 96). Der

Gussasphalt wurde ohne die Verwendung viskositätsverändernder Zusätze hergestellt. Während der Arbeiten war es trocken und sonnig. Bei einer Außentemperatur von 25 °C betrug die Luftfeuchtigkeit etwa 74 %. Mit Ausnahme des ersten Rührwerkskessels, der mit ca. 250 °C eine deutlich überhöhte Temperatur aufwies, betrug die Asphalttemperatur etwa 230 °C. Die Verarbeitung von



Bild 96: Zapfen von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze für den Handeinbau auf dem Gelände der Zeche Zollverein in Essen, [BG BAU, Teil 2]

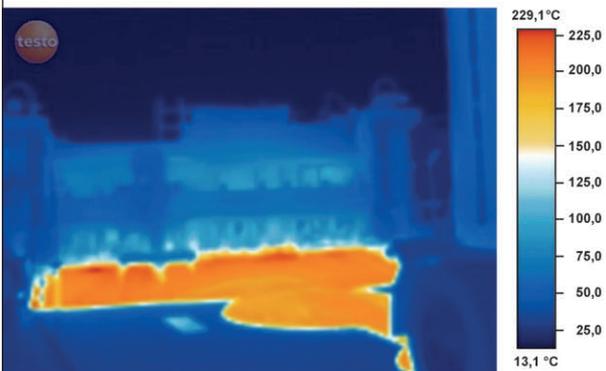


Bild 97: Einbau von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze auf der BAB A 61 (oben: Foto; unten: Wärmebild)

Hand konnte mit durchschnittlichem Arbeitsaufwand durchgeführt werden. Die Probenahme zur Bestimmung der Dämpfe und Aerosole wurde für etwa zwei Stunden durchgeführt.

Am 15. Mai 2014 wurde auf der BAB A 57 nahe der Anschlussstelle Alpen in Richtung Norden der rechte Fahrstreifen saniert. Am Tag der Arbeiten betrug die Lufttemperatur ca. 15 °C. Bei trockenem aber bedecktem Wetter wurde eine Luftfeuchtigkeit von etwa 54 % gemessen.

Mittels Gussasphalt-Fertiger kamen auf einem Abschnitt von 535 m Länge drei unterschiedliche Gussasphalt-Konzepte zum Einsatz. Im ersten Teilstück wurde ein Gussasphalt MA 8 S ohne viskositätsverändernde Zusätze bei durchschnittlich 248 °C, im zweiten Teilstück ein Gussasphalt MA 8 S mit viskositätsverändernden Zusätzen bei etwa 220 °C und im dritten Teilstück ein Gussasphalt mit viskositätsverändernden Zusätzen bei ca. 225 °C eingebaut. Wegen des erhöhten Verarbeitungswiderstandes wurde die Geschwindigkeit des Fertigers bei den Gussasphalten in den Abschnitten 2 und 3 reduziert. Unter diesen Bedingungen war der Gussasphalt gut zu verarbeiten.

Auf einem Teilstück der BAB A 61 zwischen den Anschlussstellen Waldlaubersheim und Stromberg wurde am 7. August 2014 ein Gussasphalt MA 8 S ohne viskositätsverändernde Zusätze eingebaut. Der Gussasphalt wurde von der Mischanlage in Neu-Bamberg hergestellt. Die Einbaulänge betrug etwa 560 m bei einer Breite der Gussasphaltbohle von 5,20 m und einer Schichtdicke von 3,5 bis 4,0 cm. Das Wetter am Einbautag war trocken und sonnig bei einer Lufttemperatur von ca. 25 °C war es schwach windig. Bei der durchschnittlichen Einbautemperatur von ca. 220 °C war der Gussasphalt gut zu verarbeiten. Erst bei einer zwischenzeitlichen Reduzierung der Temperatur auf 215 °C musste die Geschwindigkeit des Fertigers aufgrund des hohen Verarbeitungswiderstandes reduziert werden. Bild 97 ist der Einbau selbst (oben) und die Verteilung der Temperatur von in diesem Fall maximal 229,1 °C (unten) zu entnehmen.

Alle Baumaßnahmen wurden von der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) begleitet. Vor Ort wurden Messungen der Dämpfe und Aerosole in den am stärksten belasteten Arbeitsbereichen durchgeführt. Hierzu wurde bei maschinellem Einbau unmittelbar an der Bohle eine stationäre, das heißt mit der Bohle fahrende Messstation installiert

(Bild 98). Bei den Baumaßnahmen im Handeinbau wurden die stationären Messungen unmittelbar am Zapfhahn des Rührkessels durchgeführt. Darüber hinaus wurden sowohl im Hand- als auch bei maschinellem Einbau die Arbeitnehmer, die potenziell den stärksten Expositionen ausgesetzt sind, während der Arbeiten mit mobilen Messgeräten ausgestattet.

Da das Messverfahren zur Bestimmung der Dämpfe und Aerosole im Zuge der internationalen Zusammenarbeit im Bereich Bitumen-Analytik in den vergangenen Jahren verändert wurde, wurden die gemessenen Werte umgerechnet (Umrechnungsfaktor 1,4689). Die so ermittelten Ergebnisse entsprechen den ursprünglichen Ergebnissen, für die



Bild 98: Messung der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze auf der BAB A 61 (Pfeil zeigt auf stationäre Messstation) [BG BAU, Teil 4]

in der Vergangenheit ein Grenzwert von 10 mg/m^3 festgelegt wurde [BG BAU].

In Tabelle 20 sind die ermittelten Dämpfe und Aerosole, getrennt nach Baumaßnahme (bzw. Bauabschnitt im Fall der Baumaßnahme BAB A 57) und dem Arbeitsbereich zusammengefasst. In den Fällen, in denen die Messergebnisse unter der Nachweisgrenze lagen, ist der jeweilige minimal nachzuweisende Wert angegeben.

Die Praxismaßnahmen haben gezeigt, dass der Einbau von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze bei maximal 230 °C möglich ist. Die Verformungsbeständigkeit genügt hierbei mit statischen Eindringtiefen unter 3 mm nach 30 Minuten und einer Zunahme der statischen Eindringtiefe von $0,3$ bzw. $0,4 \text{ mm}$ zwischen der $30.$ und der $60.$ Minute bei den Gussasphalten für den maschinellen Einbau den Anforderungen der [TL Asphalt-StB, 2007] an Gussasphalte für besondere Beanspruchungen. Eine Bewertung anhand der dynamischen Eindringtiefen zeigt nach den Kriterien von [SCHELLENBERG, EULITZ, 2000] mit Eindringtiefen von maximal $1,6 \text{ mm}$ ebenfalls die Eignung für langsam rollenden bis stehenden Schwerverkehr. Das Beispiel des MA 8 S ohne viskositätsverändernde Zusätze, der auf dem Gelände der Zeche Zollverein in Essen eingebaut wurde, zeigt, dass auch der Handeinbau eines sehr verformungsbeständigen Gussasphalts bei 230 °C möglich ist.

Der Gussasphalt, der bei 220 °C von Hand eingebaut wurde, wurde dagegen aufgrund der gerin-

Baumaßnahme		Konzentration der Dämpfe und Aerosole aus Bitumen [mg/m^3]				
		Streicher/ Polier	Streicher	Kocher	Karre	Stationäre Messung
1	Essen, Berufsförderwerk der Bauindustrie NRW e. V.			< 0,41	0,48	0,61
2	Essen, Zeche Zollverein	0,41	0,48	3,13	1,09	0,34
		Zapfer	Glätter rechts	Glätter links	Fertiger- fahrer	Stationäre Messung, Fertiger
3	BAB A 57, Abschnitt 1 ($T = 248 \text{ °C}$)	7,49	3,74	4,49	< 0,41	8,17
4	BAB A 57, Abschnitt 2 ($T = 220 \text{ °C}$, viskositätsverändertes Bitumen)	2,18	< 0,54	1,70	< 0,54	
5	BAB A 57, Abschnitt 3 ($T = 225 \text{ °C}$, viskositätsverändertes Bitumen)	4,63	< 0,41	1,29	< 0,41	
6	BAB A 61	3,61	1,36	1,91	0,54	3,00

Tab. 20: Konzentration der Dämpfe und Aerosole der verschiedenen Baumaßnahmen bzw. Arbeitsbereiche, ermittelt durch die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft [BG Bau]

geren Anforderungen an die Verformungsbeständigkeit bewusst so konzipiert, dass er die Grenzwerte der [TL Asphalt-StB, 2007] nicht erfüllt. Trotz guter Verformungsbeständigkeit, die den Anforderungen an einen MA 5 N genügt, war dieser Gussasphalt bei 220 °C sehr gut, und damit bei Bedarf auch noch bei geringeren Temperaturen zu verarbeiten.

Die Emissionen lagen in allen Fällen unterhalb des früheren Grenzwertes von 10 mg Dämpfen und Aerosolen pro m³ Luft. Zu den sehr niedrigen Werten von maximal 0,61 mg/m³ bei der Baumaßnahme auf dem Lehrhof des Berufsförderwerkes der Bauindustrie NRW e. V. ist jedoch anzumerken, dass die Messdauer mit 100 Minuten relativ kurz war. Mit maximal 3,13 mg/m³ ist die Konzentration an Dämpfen und Aerosolen bei der zweiten Baumaßnahme im Handeinbau (auf dem Gelände der Zeche Zollverein in Essen) trotz höherer Asphalttemperatur von 230 °C ebenfalls niedrig. Die Expositionen entsprechen somit etwa den bei maschinelltem Einbau auf der BAB A 61 gemessenen Werten. Bei den Gussasphaltarbeiten auf der BAB A 61 wurde ebenfalls direkt am Rührwerkskessel die höchste Belastung von in diesem Fall 3,61 mg/m³ gemessen. Die Ergebnisse der Expositionsmessungen in dem Abschnitt der BAB A 57, in dem Gussasphalt mit viskositätsverändernden Zusätzen bei 220 °C eingebaut wurde, liegen mit Werten von maximal 2,18 mg/m³ im Arbeitsbereich des Zapfers leicht unter den Belastungen der Baumaßnahme BAB A 61.

Da die gemessene Konzentration an Dämpfen und Aerosolen bei allen begleiteten Baumaßnahmen deutlich unterhalb des früheren Grenzwertes von 10 mg/m³ liegen, ist der Einbau von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze bei maximal 230 °C auf Basis des früheren Grenzwertes als unbedenklich anzusehen.

Die Auswirkungen der viskositätsverändernde Zusätze auf die Konzentration an Dämpfen und Aerosolen zeigt die Baumaßnahme auf der BAB A 57 (Bild 99). Bei etwa gleichbleibenden äußeren Bedingungen ist bei dieser Messreihe eine Abhängigkeit von der Asphalttemperatur festzustellen. Mit zunehmender Temperatur nimmt bei den drei durchgeführten Messungen der Anteil der Dämpfe und Aerosole unabhängig von dem Einsatz viskositätsverändernder Zusätze in einem etwa linearen Maß zu.

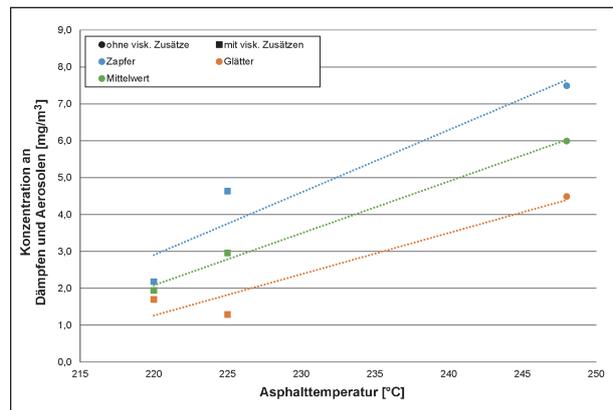


Bild 99: Dämpfe und Aerosole in Abhängigkeit von der Asphalttemperatur bei der Baumaßnahme BAB A 57

8 Zusammenfassung

Gussasphalt ist aufgrund seiner hohen Verformungsbeständigkeit und der damit verbundenen langen, schadenfreien Liegezeiten bei hohem Verkehrsaufkommen eine der wirtschaftlichsten und prinzipiell auch umweltfreundliche, weil ressourcenschonende Bauweise. Die hohe Verformungsbeständigkeit bei einem thermoviskosen Material wie Gussasphalt erfordert hohe Temperaturen zur Verarbeitung, sodass Gussasphalt klassisch bei etwa 250 °C verarbeitet wurde. Da Expositionen am Arbeitsplatz bei der Verarbeitung von Gussasphalt bei 250 °C den im Jahr 2000 gesetzten Grenzwert von 10 mg Dämpfe und Aerosole je m³ Luft überschritten, waren diese Emissionen zu reduzieren. Die angestrebte Reduzierung konnte durch den Einsatz viskositätsverändernde Zusätze und die hiermit verbundene Absenkung der Verarbeitungstemperatur auf 230 °C erreicht werden. Daher gilt ebendiese Praxis seit 2008 als Regelbauweise für den Einbau von Gussasphalt.

Das Ziel des Forschungsprojektes bestand darin, die Einflüsse der verschiedenen Gesteins- und Bindemittelkomponenten auf das Verarbeitungs- und Verformungsverhalten des Gussasphalts zu bestimmen, um so Gussasphaltvarianten ohne viskositätsverändernde Zusätze zu entwickeln, die bei noch ausreichend hoher Verformungsbeständigkeit bei maximal 230 °C verarbeitet werden können. Durch Expositionsmessungen der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) am Arbeitsplatz war die Konzentration an Dämpfen und Aerosolen zu bestimmen.

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurden Bezugswerte zur Beurteilung des Verarbeitungsver-

haltens auf Basis der Rührwiderstandsmessung des [M TA, 2011] ermittelt. Hierzu wurden zu Beginn des Forschungsprojektes von sieben Mischwerken insgesamt vierzehn praxiserprobte Gussasphalte bereitgestellt, von denen aufgrund der langjährigen Erfahrungen die minimale Einbautemperatur in situ bekannt ist. Durch eine Gegenüberstellung der gemessenen Rührwiderstandsmomente mit den aus der Praxis bekannten minimalen Einbautemperaturen konnte ein Bezugswert von 100 Ncm als das Rührwiderstandsmoment definiert werden, unterhalb dessen die Verarbeitung gut möglich ist. Bei höheren Rührwiderstandsmomenten nimmt der Verarbeitungswiderstand dagegen deutlich zu, sodass die Verarbeitung zunächst von Hand und bei einer weiteren Erhöhung der Rührwiderstandsmomente auch maschinell erschwert bzw. problematisch wird.

Die Rührwiderstandsmomente der Praxisproben stellten des Weiteren die Basis für die Optimierung des Mischvorgangs von Gussasphalt mittels Labormischer dar. Durch diese Optimierung wurden im Labor Gussasphalte hergestellt, die bezüglich Verarbeitungsverhalten und Verformungsbeständigkeit den im Mischwerk hergestellten Varianten gleicher Zusammensetzung nahezu identisch sind. Dies ist durch das Mischen von jeweils 30 kg Gussasphalt bei einer langsamen Drehzahl von 15 U/min pro Minute bei möglichst niedriger Temperatur über einen ausreichend langen Zeitraum von 48 Minuten gelungen. Eine gute Durchmischung trotz geringer Temperatur wird durch die sukzessive Zugabe des Füllers ermöglicht. So wird die Temperatur von 160 °C kontinuierlich auf 190 °C erhöht, während gleichzeitig der Füller portionsweise zugegeben wird. Zusätzlich wird die Bitumenalterung durch die Beaufschlagung des Gussasphalts mit Stickstoff während des Mischvorgangs gehemmt.

Aus den Untersuchungen der praxiserprobten Gussasphalte und einer gezielten Variation der einzelnen Komponenten Bitumen (Sorte und Gehalt), Füller sowie feine und grobe Gesteinskörnungen sollten Ansätze für eine gezielte Optimierung der Gussasphalte entwickelt werden.

Generell konnte hierbei festgestellt werden, dass Füller mit einer geringen versteifenden Wirkung – und dabei insbesondere Kalksteinfüller – die Gussasphalteeigenschaften positiv beeinflussen. Füller mit einer stärkeren versteifenden Wirkung erhöhen zwar den Verformungswiderstand des Gussasphalts; zur Gewährleistung einer ausreichenden

Verarbeitbarkeit ist der Füllergehalt jedoch derart abzusinken, dass das verringerte Volumen des Asphaltmörtels die Hohlräume im Gussasphalt nicht mehr homogen schließt.

Die Untersuchungen der feinen Gesteinskörnungen zeigten keine eindeutigen Ergebnisse. An den gezielten Laboruntersuchungen wurde zwar eine positive Wirkung durch die Erhöhung des Fließkoeffizienten festgestellt: die Verformungsbeständigkeit nimmt in einem stärkeren Maße zu als die Verarbeitbarkeit ab. Dies konnte jedoch weder an allen Laborproben noch in der Praxis als allgemeingültig bestätigt werden.

Die Zusammensetzung der groben Gesteinskörnungen zeigt bei allen Varianten, dass eine Minimierung des fiktiven Hohlraumgehalts die Eigenschaften positiv beeinflusst. Durch einen relativ geringen Anteil an Asphaltmörtel entsteht eine ausreichende Verarbeitbarkeit und im fertigen Zustand ein hohlraumfreier Gussasphalt. Durch den geringen Anteil an Asphaltmörtel wird eine hohe Verformungsbeständigkeit erzielt.

Bei einem Vergleich der bereitgestellten, praxiserprobten Gussasphalte ist eine generelle Tendenz zu besseren Eigenschaften – also eine höhere Verformungsbeständigkeit trotz ausreichender Verarbeitbarkeit – bei Gussasphalten mit geringerem Bindemittelgehalt festzustellen. Diese Feststellung besitzt jedoch ebenfalls keine Allgemeingültigkeit, da einige sehr gute Gussasphaltvarianten die höchsten Bindemittelgehalte aufweisen.

An elf verschiedenen Gussasphaltvarianten MA 5 S, MA 8 S und MA 11 S von sechs Mischwerken wurde eine Anpassung der Rezeptur durchgeführt. Hierzu wurden praxiserprobte Gussasphaltproben, die entsprechend der aktuellen Regelbauweise unter Verwendung viskositätsverändernder Zusätze hergestellt wurden, ohne diese Zusätze nachgemischt und unter sukzessiver Variation der einzelner Bestandteile auf das veränderte Bindemittel optimal abgestimmt. So wurden Gussasphalt-Rezepturen ohne viskositätsverändernde Zusätze entwickelt, die auf Basis der Laborergebnisse die geforderten Kriterien erfüllen: gute Verarbeitbarkeit bei maximal 230 °C und eine hohe Verformungsbeständigkeit entsprechend den Anforderungen der [TL Asphalt-StB, 2007] an Gussasphalte für besondere Beanspruchungen (S-Varianten).

In der Praxis wurden zwei Gussasphalte ohne viskositätsverändernde Zusätze im Handeinbau um-

gesetzt. In einem Fall wurden bewusst nur die Anforderungen an einen MA 5 N eingehalten, da eine gute Verarbeitbarkeit zwingend notwendig war. So war in situ eine gute Verarbeitbarkeit bei maximal 220 °C und damit einer um 10 °C niedrigere Temperatur als bei der zweiten Variante im Handeinbau (MA 8 S) möglich. Im maschinellen Einbau konnte ein sehr verformungsbeständiger MA 8 S ohne viskositätsverändernde trotz hoher Verformungsbeständigkeit bei etwa 220 °C eingebaut werden.

Die Expositionsmessungen zeigen in allen Fällen mit Werten von maximal 3,61 mg Dämpfe und Aerosole je m³ Luft, dass eine Verarbeitung verformungsbeständiger Gussasphalte ohne viskositätsverändernde Zusätze bei einer deutlichen Unterschreitung des früheren Grenzwertes von 10 mg/m³ möglich ist. Ein Vergleich der Expositionsmessungen während des Einbaus von Gussasphalten mit und ohne viskositätsverändernde Zusätze zeigt darüber hinaus, dass die Zusätze keinen signifikanten Einfluss auf die Konzentration an Dämpfen und Aerosolen haben, sodass die Verarbeitungstemperatur das maßgebende Kriterium ist.

Literatur

- AASHTO TP 5 (1993): Standard Test Method for Determining Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO Designation: TP5, based on SHRP Product 1007, September 1993
- ABBAS, A. R. (2004): Simulation of the micro-mechanical behavior of asphalt mixtures using the discrete element method. Dissertation, Washington State University, Department of civil and environmental engineering
- ARBIT (1994): Fahrbahndecken aus Asphalt. Arbit Schriftenreihe, Heft 59, Hamburg
- ARBIT (2010): Protokoll der Besprechung ARBIT – DAV, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e. V.
- ARS – Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (2005): Kriterien für die Wahl und Bewertung unterschiedlicher Bauweisen für den Oberbau von Bundesfernstraßen mit getrennten Richtungsfahrbahnen. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Nr. 5/2005, Bonn
- BG BAU (2012, 2014): Bericht über die Messung von Gefahrstoffen in der Luft in Arbeitsbereichen nach § 19 SGB VII. Teil 1: Vorgangsnummer 072Y-G-1 vom 23.08.2012; Teil 2: Vorgangsnummer 073L-G-1 vom 10.09.2012; Teil 3: Vorgangsnummer 085F-G-1 vom 16.07.2014; Teil 4: Vorgangsnummer 0877-G-1 vom 25.09.2014
- BMA (1997): Luftgrenzwerte für Aerosole und Dämpfe aus Bitumen bei der Heissverarbeitung. In: Begründungen und Erläuterungen zu Grenzwerten in der Luft am Arbeitsplatz, TRGS 901, Bundesarbeitsblatt 4/1997
- BRANDT, H. C. A. (1990): Polycyclic aromatics emissions from hot bitumens, Symposium on Health aspects on Asphalt Production and Paving of the European Asphalt Pavement Association (EAPA), Proceedings, pp. 171-183, Stockholm
- BRANDT, H. C. A.; CORDINGLEY, N. (1993): Personal exposure to bitumen fumes and PAC during road paving and in laboratory simulations. In: 5. EUROASPHALT congress 1993
- BUCHTA, M.; KUNESCH, C. (2006): Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat – Ergebnisse aus der Praxis. In: GESTRATA Journal, Heft 111
- DIN 1060, Teil 3: Baukalk, Physikalische Prüfverfahren
- DIN 18555, Teil 2: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln, Frischmörteln mit dichten Zuschlägen, Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehaltes
- DIN EN 1097 Teil 4 (2008): Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichteten Füller. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2008
- DIN EN 1097 Teil 7 (2008): Bestimmung der Rohdichte von Füller – Pyknometer-Verfahren. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2008
- DIN EN 13179 Teil 1 (2000): Prüfverfahren für mineralische Füller in bitumenhaltigen Mischungen – Delta-Ring- und Kugel-Verfahren. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2000

- DIN EN 13589 (2008): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bindemittel mit dem Kraftduktilitäts-Verfahren; Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 13703 (2003): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Formänderungsarbeit; Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1426 (2007): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007
- DIN EN 1427 (2007): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007
- DIN EN 14770 (2005): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR); Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 14771 (2005): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekiechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR); Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 933 (2002): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften, Fließkoeffizient von Gesteinskörnungen
- EULITZ, H.-J.; DAMM, K.-W.; AMMADI, M. (2004): Erweiterte Eignungsprüfungen für Brückenbeläge aus Gussasphalt. In: Bitumen Jahrgang 66, Heft 4, Seite 150-154
- Expositionsbeschreibung (2008): Maschinelles Verarbeiten von Gussasphalt
- FUHST, R. (2009): Bitumenverarbeitung im Straßenbau – Frauenhofer ITA untersucht mögliche kanzerogene Effekte nach inhalativer Exposition. Frauenhofer-Gesellschaft, Internet
- Gesprächskreis Bitumen (2009): Sachstandsbericht, Flörsheim am Main
- GÖTZ, M.; RÜHL, R. (2007): Ab 2008 nur noch Gussasphalt bei abgesenkten Temperaturen. In: TIEFBAU 12/2007, BG-Bau
- HUTSCHENREUTHER, J.; WÖRNER, T. (1998): Asphalt im Straßenbau. Verlag für Bauwesen, Berlin
- KADELKA, F. (1988): Verwendung von feinteiligem Gasbeton als Zusatzstoff im Asphaltmischgut zur Herstellung von Guss- und Walzasphalt. Europäische Patentanmeldung, Veröffentlichungsnummer 0 291 898
- KNECHT, U.; WOITOWITZ, H. J. (1997): Untersuchungen zum Gehalt von PAH in Materialproben, laborexperimentell erzeugten Emissionen, ..., verschiedener Bitumensorten unterschiedlicher Rohöl-Provenienzen, bzw. Hersteller/Lieferanten, Justus Liebig Universität Giessen
- KÖHLER, M.; HERR, B.; BIERMANSKI, T. (2003): Prüfung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. In: Bitumen Jahrgang 65, Heft 1, Seite 14-17
- KREBS, H. G.; ARAND, W. (1976): Bestimmung der Rütteldichte von brechkornhaltigen Mineralstoffgemischen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 196, Bundesministerium für Verkehr, Bonn
- MEZGER, T. (1996): Rheologische Beurteilung von Bitumen und Asphalt als Bindemittel für den Straßenbau. PHYSICA Messtechnik, Stuttgart
- MEZGER, T. (2006): Das Rheologie Handbuch, 2. Auflage. Vincentz Network Verlag, Hannover
- M TA (2011): Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- NÖSLER, I.; GOOS, D. (2009): Modifizierte Spezialbitumen für leistungsoptimierte Asphaltbeläge. Vortrag auf dem VSVI Seminar in Friedberg/Hessen
- PIRINGER, G.; SCHILLER, W. (2009): Gussasphalt in der Praxis – Eigenschaften und Einsatzgebiete. In: GESTRA Journal, Heft 125
- RADENBERG, M. (2007): Temperaturabsenkung bei Asphalt – Grundlagen und Erfahrungen. Tiefbau 2007
- RADENBERG, M.; SANDER, R. (2007): Lärmtechnisch optimiert – Asphaltdeckschichten für den kommunalen Straßenbau. In: Asphalt, Heft 8
- REIFIG, J. (2009): Bitumen und damit Asphalt unbedenklich. In: Asphalt

- RPE-Stra 01 (2001): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2001
- RUBACH, K. (1995): Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Mineralstoffgemischen für Gussasphalte im Zustand definiert dichter Lagerung zur Abschätzung des Bindemittelüberschusses. In: Asphalt, Heft 1
- RÜHL, R. (2008): Nur noch mit abgesenkter Temperatur. In: Sonderdruck aus der Zeitschrift asphalt 4/2008
- SCHELLENBERG, K. (2009): Welche kompositionellen Einflüsse bestimmen die Eigenschaften des Gussasphaltes? Vortrag auf dem Gussasphalt-Symposium im Ausbildungszentrum der Bauindustrie NRW in Essen
- SCHELLENBERG, K.; EULITZ, H.-J. (2000): Ansprache des Verformungswiderstandes von Gussasphalt mit dem dynamischen Eindringversuch mit einem Stempel – Weiterentwicklung und Bewertungshintergrund
- SCHELLENBERG, K.; SCHELLENBERG, P. (2001): Optimierung der Zusammensetzung und der Eigenschaften von Gussasphalt an einem Beispiel. In: Bitumen Jahrgang 63, Heft 2, Seite 56-60
- SCHELLENBERG, P.; SCHELLENBERG, K. (2010): Die Viskositäten von Bindemittel und Asphaltmörtel im Zugretardationsversuch mit Anwendungsbeispielen. In: Straße und Autobahn, Heft 6.2010, Seite 392-397
- SCHELLENBERGER, W.; WEISE, G.; FREYBURG, E. (2000): Untersuchungen zur Qualität von Füllern und Edelbrechsanden. In: Straße und Autobahn, Heft 10/2000, Seite 650-660
- SIKINGER, T.; SIMMLEIT, N.; MERTENS, N.; HOSCHIED, R. (2001): Einfaches Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. In: Bitumen Jahrgang 63, Heft 4, Seite 144-149
- SPIEGL, M. (2008): Tieftemperaturverhalten von bituminösen Baustoffen – Labortechnische Ansprache und numerische Simulation des Gebrauchsverhaltens. Dissertation, Wien
- SPRINGER, E.; THIEMANN, F.; ZUTZ, R. (1995): Messung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. In: Bitumen Jahrgang 57, Heft 3, Seite 114-118
- STEINAUER, B.; SCHARNIGG, K. (2007): Vergleich der Prüfverfahren zur Ansprache der Verformungseigenschaften von Asphalt. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 959, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 2007
- STOLZ, J.; WEGMANN, L. (2001): Luftschadstoffe – Emissionen von Straßenbaustellen. Teil II: Aerosole und Partikel, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Bundesamt für Straßen, Bern
- SUSS, G.; SCHUHBAUER, A.; HALFMANN, U.; HAAG, G.; GEISLER, H.; ASENBAUM, K. (1982): Untersuchung der Eignung von Gesteinsmehlen als Füller zur Herstellung von Asphaltbetondeckschichten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 360, Bundesministerium für Verkehr, Bonn
- TL Asphalt-StB 07 (2007): Technische Lieferbedingungen für Asphaltgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TL Bitumen-StB 07 (2007): Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 20 (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 20: Eindringtiefe an Gussasphaltwürfeln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 25A1 (2009): Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25A1: Dynamischer Stempel Eindringversuch an Gussasphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2009
- TP Asphalt-StB, Teil 35 (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau – Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln

- TROGISCH, H. (2003): Auswirkungen der Granulometrie von Brechsanden auf Asphalteeigenschaften. Dissertation, Bochum
- WALTER, D. (2006): Untersuchungen zum Gehalt von arbeitsmedizinisch-toxikologisch relevanten Inhaltsstoffen in Bitumen und Bitumen-Emissionen sowie human-experimentelle Versuche zu deren dermalen Resorption, Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- WÖRNER, T.; STÜTZ, M.; WESTEINER, E. (2008): Ersatz des Brechsand/Natursand-Verhältnisses durch den Fließkoeffizienten. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Bonn
- ZTV Asphalt-StB 07 (2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- Bild 8: Auswirkungen eines Diabas-Füllers (30 Vol.-%) auf den Phasenwinkel eines RFTO-gealterten Bitumen PG64-28 bei 50 °C [ABBAS, 2004]
- Bild 9: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit vom Verhältnis Füller zu Bitumen [EULITZ et al., 2004]
- Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Biegekiechsteifigkeit
- Bild 11: Grafische Bestimmung des m-Werts
- Bild 12: Flügelrührer [SPRINGER et al., 1995]
- Bild 13: Skizze des Rührtopfs und des Rührers [M TA, 2006]
- Bild 14: Schematische Darstellung des modifizierten Rührers [M TA, 2011]
- Bild 15: Verarbeitbarkeit des Gussasphalts – allgemeiner Messaufbau [SCHELLENBERG, 2009]

Bilder

- Bild 1: Anteile der Dämpfe und Aerosole am Gesamtmesswert [RÜHL et al.]
- Bild 2: Häufigkeitsverteilung der Fließkoeffizienten bei Brechsand und Natursand [WÖRNER et al., 2008]
- Bild 3: Bindemittelüberschuss in Abhängigkeit von der Temperatur [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2001]
- Bild 4: Mittlerer Hohlraumgehalt der Krongemische 0/8 mit Diabas und Grauwacke [RADENBERG, SANDER, 2007]
- Bild 5: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Mörtelviskosität bei 35 °C nach [SCHELLENBERG, SCHELLENBERG, 2001]
- Bild 6: Typische Funktionsverläufe des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels bei reinem Bitumen
- Bild 7: Auswirkungen eines Diabas-Füllers (30 Vol.-%) auf den komplexen Schermodul eines RFTO-gealterten Bitumen PG64-28 bei 50 °C [ABBAS, 2004]
- Bild 16: Darstellung des Laststempels und der Belastungsphase [TP Asphalt-StB, Teil 25, 2007]
- Bild 17: Zusammenhang zwischen der Spurrinnentiefe von Brückenbelägen aus unterschiedlich zusammengesetzten Gussasphalten vom Typ GA 0/11 [SCHELLENBERG, 2009]
- Bild 18: Ablaufschema des Untersuchungsprogramms
- Bild 19: Labormischer zur Herstellung des Gussasphalts
- Bild 20: Schematische Darstellung des optimierten Herstellungsprozesses von Gussasphalt
- Bild 21: Darstellung der Ansätze zur systematischen Optimierung
- Bild 22: Belastung des Balkens im BBR
- Bild 23: Dynamisches Scher-Rheometer (DSR) inkl. Messgeometrie
- Bild 24: Asphaltmörtel mit zu geringem Bindemittelgehalt bei einem stark versteifenden Füller

- Bild 25: Normgerechter (oben) und aufgrund der zu hohen Bindemittelsteifigkeit während der Probenherstellung ungeeigneter (unten) Balken zur Überprüfung der Kälteeigenschaften mittels BBR
- Bild 26: Rütteltisch des Straßenbaulabors der Ruhr-Universität Bochum
- Bild 27: Maschineller Gussasphalteinbau
- Bild 28: Statische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A5, A8, B8, C8, E8
- Bild 29: Statische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A11, B11, C11, D11, E11, F11
- Bild 30: Dynamische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A5, G5, A8, B8, C8, E8
- Bild 31: Dynamische Stempel Eindringtiefe der Gussasphaltproben A11, B11, C11, E11, F11
- Bild 32: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Proben A5, G5, A8, B8, C8, E8, G8
- Bild 33: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Proben A11, B11, C11, D11, E11, F11, G11
- Bild 34: Rührversuch bei einem nicht fließfähigen Gussasphalt
- Bild 35: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente unterschiedliche hergestellten Gussasphalten gleicher Rezeptur
- Bild 36: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Proben A11 und A11*
- Bild 37: Korngrößenverteilung der Füller mittels Laser-Partikel-Sizer
- Bild 38: Rohdichte der Füller
- Bild 39: Hohlraumgehalte der Füller
- Bild 40: Erweichungspunkt RuK der Bitumen 20/30 und 30/45 sowie der mit damit hergestellten Mörtel
- Bild 41: Kraft-Weg-Kurven der Kalksteinmörtel unter Verwendung des Bitumens 30/45, (Prüftemperatur 50 °C)
- Bild 42: Kraft-Weg-Kurven der Mörtel DH30, SB30, KK30, MK30, SK30 und QH30, (Prüftemperatur 50 °C)
- Bild 43: Kraft-Weg-Kurven der Mörtel unter Verwendung des Bitumens 20/30, (Prüftemperatur 50 °C)
- Bild 44: Gussasphalt-Variante A11_{F3} nach dem Mischen
- Bild 45: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der Varianten A11_{F1} bis A11_{F7}
- Bild 46: Statische Stempel Eindringtiefen der Varianten A11_{F1} bis A11_{F5}
- Bild 47: Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen
- Bild 48: Fließkoeffizienten der feinen Gesteinskörnungen der Varianten A11_{fGk5} bis A11_{fGk8}
- Bild 49: Rührwiderstandsmomente der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen
- Bild 50: Statische Stempel Eindringtiefen der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen
- Bild 51: Hohlraumgehalte der feinen und groben Gesteinskörnungen der Varianten A5, A8, A11, B8, B11, C8, C11, F11 in den durch die Erstprüfung gegebenen Zusammensetzungen
- Bild 52: Hohlraumgehalte der feinen und groben Gesteinskörnungen der Varianten A11_{gGk1} bis A11_{gGk4}
- Bild 53: Vergleich zwischen statischer und dynamischer Stempel Eindringtiefe der Basis-Gussasphalte
- Bild 54: Gegenüberstellung der statischer Stempel Eindringtiefe und der minimalen Einbautemperatur gemäß Rührwiderstandsmoment der Basis-Gussasphalte
- Bild 55: Gegenüberstellung der dynamischen Stempel Eindringtiefe und der minimalen Einbautemperatur gemäß Rührwiderstandsmoment der Basis-Gussasphalte
- Bild 56: Korngrößenverteilungslinien ausgewählter Füller bzw. Füllergemische

- Bild 57: Einfluss des Hohlraumgehalts nach RIGDEN auf die versteifenden Eigenschaften
- Bild 58: Biegekiechsteifigkeit der Mörtel bei -5 °C im Verhältnis zu dem jeweiligen Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 59: m-Wert der Mörtel bei -5 °C im Verhältnis zu dem jeweiligen Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 60: Biegekiechsteifigkeit der Mörtel bei -5 °C und der Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 61: m-Wert der Mörtel bei -5 °C und der Basisbitumen bei -16 °C (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 62: Korrelation der Kraftmaxima der Mörtel auf Basis der Bitumen 20/30 und 30/45 (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$, Messtemperatur 50 °C)
- Bild 63: Korrelation der Formänderungsarbeiten der Mörtel auf Basis der Bitumen 20/30 und 30/45 (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$, Messtemperatur 50 °C)
- Bild 64: Korrelation zwischen Kraftmaximum und Formänderungsarbeit der Mörtel auf Basis des Bitumen 20/30 (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$, Messtemperatur 50 °C)
- Bild 65: Kraftmaximum und Formänderungsarbeit der Mörtel auf Basis des Bitumen 20/30 (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$, Messtemperatur 50 °C)
- Bild 66: Temperaturabhängige komplexe Schermoduln verschiedener Mörtel (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 67: Temperaturabhängige versteifende Wirkung der verschiedenen Gesteinsarten anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 68: Temperaturabhängig versteifende Wirkung ausgewählter Füller anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 20/30, Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 69: Temperaturabhängige versteifende Wirkung der Füller verschiedener Kalksteinfüller anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 70: Temperaturabhängig versteifende Wirkung der Füllergemische anhand des komplexen Schermoduls (Bitumen 30/45, Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 71: Korrelation der Biegekiechsteifigkeit bei -5 °C und dem komplexen Schermodul bei 0 °C (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$)
- Bild 72: Korrelation zwischen Kraftmaximum und komplexem Schermodul der Mörtel auf Basis des Bitumen 30/45 (Mischungsverhältnis $F/B = 70/30$, Messtemperatur 50 °C)
- Bild 73: Bewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Kälteverhalten der Mörtel
- Bild 74: Bewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Wärmeverhalten der Mörtel
- Bild 75: Bewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Einbauverhalten der Mörtel
- Bild 76: Gesamtbewertung des Einflusses der Füller bzw. Füllergemische auf das Mörtelverhalten
- Bild 77: Zusammenhang zwischen minimaler Einbautemperatur und Fließkoeffizient der Varianten $A11_{fGk1}$ bis $A11_{fGk8}$
- Bild 78: Zusammenhang zwischen statischer Eindringtiefe und Fließkoeffizient der Varianten $A11_{fGk1}$ bis $A11_{fGk8}$
- Bild 79: Statische Eindringtiefe, minimale Einbautemperatur und Fließkoeffizient der Varianten $A11_{fGk1}$ bis $A11_{fGk8}$
- Bild 80: Zusammenhang zwischen statischer Eindringtiefe und minimaler Einbautemperatur der Varianten $A11_{fGk1}$ bis $A11_{fGk8}$
- Bild 81: Korrelation zwischen Hohlraumgehalt und minimaler Einbautemperatur ausgewählter Basis-Gussasphalte
- Bild 82: Schematische Darstellung des berechneten Mörtelüberschusses

- Bild 83: Korrelation zwischen Mörtelüberschuss und minimaler Einbautemperatur ausgewählter Basis-Gussasphalte
- Bild 84: Korngrößenverteilungen der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S
- Bild 85: Korngrößenverteilungen der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S
- Bild 86: Korngrößenverteilungen der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S
- Bild 87: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S
- Bild 88: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S
- Bild 89: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S
- Bild 90: Zeitabhängige statische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S
- Bild 91: Zeitabhängige statische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S
- Bild 92: Zeitabhängige statische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S
- Bild 93: Lastzyklusabhängige dynamische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 5 S
- Bild 94: Lastzyklusabhängige dynamische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 8 S
- Bild 95: Lastzyklusabhängige dynamische Stempel Eindringtiefe der optimierten Gussasphalte der Sorte MA 11 S
- Bild 96: Zapfen von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze für den Handeinbau auf dem Gelände der Zeche Zollverein in Essen [BG BAU, Teil 2]
- Bild 97: Einbau von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze auf der BAB A 61 (oben: Foto; unten: Wärmebild)

- Bild 98: Messung der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Gussasphalt ohne viskositätsverändernde Zusätze auf der BAB A 61 (Pfeil zeigt auf stationäre Messstation) [BG BAU, Teil 4]
- Bild 99: Dämpfe und Aerosole in Abhängigkeit von der Asphalttemperatur bei der Baumaßnahme BAB A 57

Tabellen

- Tab. 1: Übersicht über die Expositionen für Dämpfe und Aerosole aus Bitumen beim maschinellen Einbau von Gussasphalt [Expositionsbeschreibung, 2008]
- Tab. 2: Richtwerte für die dynamischen Eindringtiefen nach [SCHELLENBERG, EULITZ, 2000]
- Tab. 3: Verwendete Basis-Gussasphalte inkl. zugeordnetem Materialkürzel
- Tab. 4: Verwendete Füller
- Tab. 5: Verwendete Mörtel
- Tab. 6: Wahl des Mischungsverhältnisses des Asphaltmörtels
- Tab. 7: Füllerzugabe der Gussasphalte
- Tab. 8: Verwendete feine Gesteinskörnungen I
- Tab. 9: Feine Gesteinskörnungen der Gussasphalte
- Tab. 10: Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs zur Bestimmung der Rütteldichte (mit feinen Gesteinskörnungen)
- Tab. 11: Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs zur Bestimmung der Rütteldichte (ohne feinen Gesteinskörnungen)
- Tab. 12: Zusammensetzung der Basis-Gussasphalte
- Tab. 13: Temperaturabhängige Rührwiderstandsmomente
- Tab. 14: Minimale Einbautemperatur der Gussasphaltproben gemäß Rührwiderstandsmessung und laut Herstellerangaben

- Tab. 15: Minimale Einbautemperatur laut Rührwiderstandsmessung der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen
- Tab. 16: Minimale Einbautemperatur laut Rührwiderstandsmessung der Gussasphalte mit unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen
- Tab. 17: Zusammensetzung der optimierten Gussasphalte
- Tab. 18: Minimale Einbautemperatur laut Rührwiderstandsmessung der optimierten Gussasphalte
- Tab. 19: Zusammenfassung der stat. und dyn. Stempelindringversuche der optimierten Gussasphalte
- Tab. 20: Konzentration der Dämpfe und Aerosole der verschiedenen Baumaßnahmen bzw. Arbeitsbereiche, ermittelt durch die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft [BG Bau]

Anhang

Füller	DH	KBe	KF	KH	KM	QH	SB	Ka	Mi
Korngröße	Durchgang								
[μm]	[M.-%]								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	0,8	2,1	1,2	1,9	1,9	0,4	1,2		2,4
1	3,1	8,3	4,4	7,2	7,3	2,4	4,7	4,6	7,2
2	8,4	17,7	9,0	15,6	16,2	6,5	12,2	13,7	15,5
5	19,7	33,3	17,9	30,5	32,6	13,9	31,4	38,7	44,1
10	30,7	52,5	31,0	49,1	48,4	21,6	50,0	67,4	81,5
20	49,6	83,0	55,6	72,3	67,9	37,4	72,0	87,6	99,9
30	61,3	94,5	69,1	80,2	78,8	48,2	85,0	94,3	100,0
32	63,0	95,6	70,8	81,0	80,3	49,9	87,0	94,9	100,0
40	69,1	97,4	75,7	82,7	85,0	56,1	93,0	96,8	100,0
50	74,4	98,1	79,6	83,7	88,9	62,2	96,7	98,2	100,0
60	77,9	98,2	82,4	84,2	91,8	67,1	98,3	99,0	100,0
63	78,8	98,2	83,2	84,3	92,5	68,5	98,6	99,2	100,0
70	80,7	98,2	84,8	84,6	94,1	71,9	99,1	99,5	100,0
80	83,0	98,3	86,9	84,9	95,8	76,5	99,6	99,8	100,0
90	84,8	98,3	88,8	85,3	97,0	80,9	99,8	100,0	100,0
100	86,2	98,3	90,4	85,7	97,9	84,8	99,9	100,0	100,0
125	88,8	98,3	93,5	86,7	99,0	92,1	100,0	100,0	100,0
250	92,9	98,2	97,6	88,9	99,7	99,4	100,0	100,0	100,0
500	98,5	99,8	98,6	95,5	99,8	99,9	100,0	100,0	100,0
1000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. A1: Korngrößenverteilung der verwendeten Füller bzw. Zusätze

Mörtelvariante	30/45	DH30	KBe30	KBr30	KF30	KH30	KM30
Temperatur	Komplexer Schermodul						
[°C]	[Pa]						
0	97784727	586984233	616015536	615496750	575913083	580086988	590268100
10	28021051	245202000	257851420	248048575	225594817	207162720	200734440
20	5819832	66098030	67628293	60227290	54934155	48563016	45963916
30	1001743	12784842	12992371	11463445	10002014	8960785	8494742
40	157.200	2251591	2311912	1942870	1744777	1622457	1512528
50	31349	447519	452952	393258	353869	328428	303288
60	7268	104524	104003	103750	77447	79510	73943
80	540	7.478	7408	4862	5.320	5940	4963
100	75,9	967	1126	767	816	1026	727
120	17,0	286	241	189	188	226	166
140	5,4	124	68,6	58,9	57,6	66,0	50,4
160	-	51,7	25,3	20,3	18,2	22,2	17,8
180	-	16,5	11,6	10,5	8,3	9,1	8,6
200	-	8,7	6,1	6,7	4,9	5,3	5,2

Tab. A6: Temperaturabhängige komplexe Schermoduln es Bitumen 30/45 und der Mörtel DH30, KBe30, KBr30, KF30, KH30 und KM30

Mörtelvariante	QH30	SB30	SB30*	SK30	KK30	MK30
Temperatur	Komplexer Schermodul					
[°C]	[Pa]					
0	584521867	669213800	545495431	659658750	718327546	646828903
10	215414017	269301700	224837899	252053700	314631729	254673338
20	51004392	79037052	57683434	65672688	82037262	66988061
30	9386794	17661795	11136290	12579448	15959256	13996879
40	1673363	3200170	1964912	2246779	2811392	2630095
50	350024	597670	380773	430809	543826	520543
60	82767	214053	87734	100381	128321	120870
80	84527	9595	6576	6696	8024	8126
100	5840	1167	1174	993	1107	1261
120	880	310	292	221	251	288
140	201	115	103,3	66	76,2	90,2
160	63,5	50,3	39,3	24,2	29,0	32,8
180	19,1	19,5	14,5	9,7	11,9	13,5
200	8,5	9,1	6,2	5,5	7,0	7,6

Tab. A7: Temperaturabhängige komplexe Schermoduln der Mörtel QH30, SB30, SB30*, SK30, KK30 und MK30

Mörtelvariante	20/30	KBe20	KF20	KH20	KM20	SB20	SK20	KK20
Temperatur	Komplexer Schermodul							
[°C]	[Pa]							
0	136337200	765106767	759913142	844970575	769991893	864252400	842729275	887708030
10	40766426	356159496	341762379	382369200	338546800	410222383	410540600	433817490
20	8995606	110840729	98353551	112249608	98373517	148837983	132434238	142807080
30	2057000	24572912	20149288	23335702	20418514	36434703	27960231	33415028
40	387900	4712937	3641023	4276981	3797074	8692238	5214711	6287269
50	78160	906437	692958	827376	732949	1930701	995471	1204593
60	17244	205817	155694	189257	165789	417299	220795	265074
80	1235	13048	10006	10776	10595	27440	13183	14824
100	149	1689	1360	1470	1381	2150	1690	1935
120	30,3	347	290	327	279	506	370	409
140	8,7	92,3	85,7	94,7	81,1	163,0	103	121,8
160	-	33,8	28,1	27,2	28,5	55,2	35,0	40,3
180	-	14,4	12,1	9,7	12,7	18,1	15,3	18,4
200	-	7,5	7,3	5,6	7,4	10,0	8,7	9,8

Tab. A8: Temperaturabhängige komplexe Schermoduln des Bitumen 20/30 und der Mörtel KBe20, KF20, KH20, KM20; SB20, SK20, KK20

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)

Alisov, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost € 15,50

S 136: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**

Augter, Kayser € 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**

Weise, Werner, Maier, Wilsch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: **Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.