

Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 141

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font with a white outline. The letters are slightly shadowed to give a 3D effect. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs from the top to the bottom of the page.

Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

von

Martin Radenberg
Ricarda Manke

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 141

bast

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt 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 Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.0247/2011/AGB:
Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

Fachbetreuung
Franz Bommert

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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 978-3-95606-488-3

Bergisch Gladbach, Dezember 2019

Kurzfassung – Abstract

Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

Eine der derzeitigen Schwierigkeiten bei dem Einsatz von gummimodifizierten Asphalten (GmA) liegt in der nicht hinreichend genauen Bindemittelgehaltsbestimmung durch Extraktion bei der Kontrollprüfung nach den [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007]. Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es daher, Hinweise und Empfehlungen zur Verbesserung der Präzision bei der Bestimmung des Bindemittelgehaltes von GmA zu erarbeiten.

In einer ausführlichen Untersuchungsreihe wurden im Labor hergestellte SMA 8 S und PA 8, die sowohl im Nass- als auch Trockenverfahren unter Variation des Grundbitumens, des Gummimehlanteils und unter variierenden Mischtemperaturen, Misch- und Lagerungszeiten modifiziert wurden, nach den [E GmBA, 2012] extrahiert.

Da sich nur ein Teil des Gummimehles im Bindemittel löst, galt es die im Gesteinskörnungsgemisch verbleibenden ungelösten Gummipartikel möglichst präzise zu erfassen. Dabei stieß die angewendete Vorgehensweise an Grenzen. Das Verhältnis zwischen gelösten und ungelösten Gummipartikelanteilen ist in Abhängigkeit von dem eingebrachten Gummimehlanteil und aufgrund von unvermeidbar unterschiedlicher Gummimehlqualitäten nicht konstant. Eine weitere Ursache für Schwankungen war, dass sich nach der Extraktion Fülleranteile in dem ungelösten Gummipartikelanteil und Gummipartikel im Gesteinskörnungsgemisch wiederfinden ließen. Die Ermittlung des Mittelwertes der ungelösten Gummipartikel aller durchgeführten Extraktionen ergab einen Wert von 75 % . Wie durch die vorherigen Bewertungen zu erwarten, ergab sich jedoch eine große Spannweite von 43 bis 107 %.

Mit dem Extraktionsverfahren nach den [E GmBA, 2012] scheint demnach prüftechnisch kein hinreichend genaues Vorgehen zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes von GmA und zum ungelösten Gummipartikelanteil zu erzielen zu sein.

Als alternative Methode wurde die Veraschung solcher Asphalte eingesetzt und eine empfohlene Vorgehensweise entwickelt. Dieses Verfahren ist unabhängig von der bisherigen Extraktion mit dem Lösemittel Trichlorethylen und den damit ver-

bundenen einzuhaltenden Arbeitssicherheitsbestimmungen. Erste Versuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes zeigen plausible und vielversprechende Ergebnisse, die durch weitere Untersuchungsreihen zur Optimierung und zur Validierung des Verfahrens ergänzt werden müssen.

Determination of binder content in asphalt with rubber-modified binder

Currently, one of the main problems when using rubber-modified asphalt (RmA) is the proper determination of binder content by extraction during check tests with [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007]. Therefore, this project's main aim was acquiring suggestions and recommendations for defining the determination of RmA's binder content more precisely.

Laboratory produced SMA 8 S and PA 8, prepared both under dry and wet circumstances and modified with variable bitumen grades, contents of rubber powder, mixing temperatures as well as mixing and storage times was extracted regarding the [E GmBA, 2012] in detailed series of testing.

As only parts of the rubber powder dissolve in binder, undissolved particles in aggregate mixtures had to be determined precisely, which soon met the limits of the commonly used procedures. Inevitable differences in the quality of rubber powder as well as the added rubber content lead to non-constant relations between dissolved and undissolved rubber particles. Further, recovered filler in undissolved rubber parts as well as rubber in aggregate mixtures caused such fluctuations. The average amount of recovered undissolved rubber particles was 75%, while a widespread range between 43% and 107% existed due to previously explained valuation.

The extraction regarding the [E GmBA, 2012] does apparently not offer a sufficient method for the determination of binder content and content of rubber in RmA.

Alternatively, incineration was applied and recommendations were developed. The procedure is independent of extraction using trichloroethylene and its related safety regulations. First tests, performed within this research project, showed plausible and promising results, which must be amplified by further tests for optimization and validation.

Summary

Determination of binder content in asphalt with rubber-modified binder

1 Problem and purpose

In compliance with defined processing conditions, rubber-modified asphalt can represent a resource saving alternative to polymer-modified bitumen. Rising oil prices make it financially attractive as well. Furthermore, a positive effect on asphalt performance is expected by the rubber modification of bitumen.

However, one of the main problems using rubber-modified asphalt is the proper determination of binder content by extraction during check tests according to [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007]. This is due to the necessary undissolved rubber particles which cannot be measured reliably with the currently used extraction devices, a consequence of the partially dissolved rubber powder in bitumen.

Therefore, the main aim of this project was acquiring suggestions and recommendations for defining the determination of rubber-modified asphalt's binder content more precisely.

Within the scope of the research project, the binder content was determined during the extraction of the mixture with an automated extraction device according to [E GmBA, 2012]. The two asphalt types porous asphalt (PA 8) and stone mastic asphalt (SMA 8 S) were examined. Both were modified in the wet process and the dry process with variation of the base bitumen, the rubber powder amount and varying mixing temperatures, mixing periods and storage periods.

In addition the incineration of such asphalts was used as an alternative method and a recommended procedure was developed. This procedure is independent of the previous extraction with the solvent trichlorethylene and thus of the related safety regulations.

Furthermore, existing routes, in which rubber-modified bitumen and asphalt was already used, were consulted to obtain knowledge about the precision of the binder content determination at the current time.

2 Research program

2.1 Laboratory tests to determine the binder content

The rubber modification of asphalt was comparative examined in the wet and dry process according to [E GmBA, 2012], whereby the focus was on the wet process.

The road pavement bitumen of the type 50/70 and 70/100 were selected as the base bitumen. The rubber powder amounts, with reference to the binder content, varied with 10 M.-% (mass percent), 20 M.-% and 30 M.-%. In this case, a binder carrier was not needed as the rubber powder assumes this function. The rubber powder was used in the granulation 0.2 mm to 0.8 mm. Additionally, a crosslinker (polyoctenamer) with an amount of 4.5 M.-%, with reference to the rubber powder, was used for the modification.

Besides the actual stirring process and modification process the rubber modification of the bitumen comprises an additional maturity process resp. swelling process of the rubber particles. In order to be able to relate the effect of those conditions on the determination of the binder content, mixing temperature as well mixing period and storage period were varied.

Besides the different rubber-modified bitumen that were produced in the laboratory, an additional rubber-modified prefabricated binder was selected. The production of the asphalt took place both in the wet process and dry process under variation of the mixing period and the storage period.

Figure 1 outlines the different test variations.

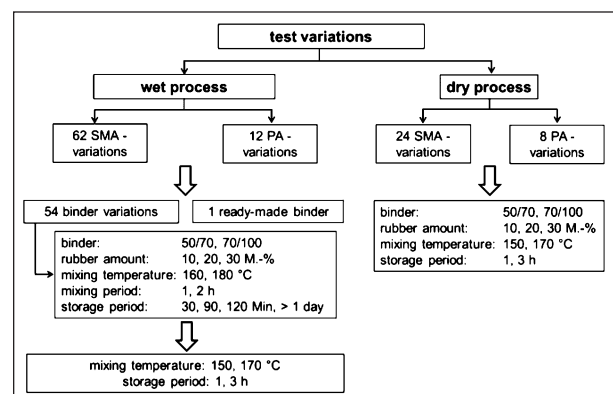


Fig. 1: Test variations

To avoid effects of different rock or bitumen qualities on the outcome of this study, the same base material was used to produce the asphalt samples for the laboratory tests. Likewise the binder content as well as the aggregate composition (grading curve) was kept constant within one type of asphalt, to specifically examine the effect of the rubber powder in the binder resp. asphalt on the binder content by different production conditions.

The binder contents of 7.0 M.-% for the SMA 8 S and 6.5 M.-% for the PA include the rubber powder amount of 10 M.-%, 20 M.-% or 30 M.-%.

The procedure for the determination of the binder content with the extraction device was based on the [E GmBA, 2012].

During activities with the solvent trichlorethylene, industrial safety must be observed. Therefore, the described, manual sample pre-treatment and the extraction took place under outlet and ventilation. If necessary, personal protection gear needs to be worn (e.g. respirator).

2.2 Tests with produced rubber-modified bitumen

For the examination of the fundamental effect of different hot storage periods, an additional test series for the extraction of pure rubber-modified bitumen was implemented. Withal a road pavement bitumen 50/70 with 20 M.-% rubber powder (50/70+20GG) was mixed and then stored by a temperature of 180 °C for various periods (0.5, 2, 5, 16, 32, 48 and 72 hours).

The resulting rubber-modified bitumen were verified on their rheological behaviour with the dynamic shear rheometer (DSR) according to the [DIN EN 14770, 2006].

Furthermore the rubber-modified bitumen were extracted with trichlorethylene, by decanting the binder-solvent-mixture above a 0.09 mm sieve and by capturing the undissolved rubber particles. In order to evaluate the effect of the hot storage periods and the potential dissolved rubber particles, the softening point ring and ball according to [DIN EN 1427, 2007] and the needle penetration according to [DIN EN 1426, 2007] were determined on the extracted recovered rubber-modified binder. Also the rheology was analysed with the dynamic shear rheometer (DSR) according to [DIN EN 14770, 2006].

2.3 Incineration and constructional measure

The incineration method was consulted in a separated step to determine a binder content of rubber-modified asphalt with sufficient accuracy, independently of the conventional extraction with the solvent trichlorethylene and the safety regulations attached to them. During the incineration, the material is burned by thermal stress by means of a muffle furnace.

The fundamental aim of the incineration is to incinerate the rubber-modified asphalt during the check test and to determine the remaining mineral amount (differencing method).

The exact approach and the interpretation of the knowledge of the incineration are described in chapter 3.3 below.

As construction-accompanying final step an urban road route was selected. On this route the asphalt surface was renewed with the application of rubber-modified binder in the wet process.

The mixture sampling took place at different times: first directly after the mixing and a necessary add-on hot soiling period on the mixing system, then at the beginning and finally in the middle of the paving process.

The mixture was also extracted for the determination of the binder amount and the undissolved rubber particle amount. Thereby the undissolved rubber particle amount was determined according to [E GmBA, 2012]. Furthermore the above-described procedure for the determination of the binder content through incineration was verified at this constructional measure.

3 Test results and interpretation

3.1 Laboratory tests to determine the binder content

In total, 133 extractions were analyzed by determining the binder content without rubber particle amount, the binder content with rubber particle amount and the undissolved rubber particle amount. The undissolved rubber particle amount in [M.-%] – e.g. 15.0 M.-% – is the amount that did not separate from the added rubber powder amount in [M.-%] – e.g. 20.0 M.-%. A next step showed this value

independently from the different dosages by normalizing it and expressing it in [%] - e.g. 75.0% of the rubber particles did not dissolve in the bitumen.

First, the undissolved rubber particle amount in [M.-%] was taken as a function of the various mixing periods, hot storage periods and mixing temperatures, both during the production of the rubber-modified bitumen and the asphalt using the method of multiple linear regression. Withal the calculation was implemented separately for the production method of the rubber-modified asphalts, dry and wet process, to determine eventual correlations.

In figure 2 all determined undissolved rubber particle amounts in [M.-%] of the asphalts SMA 8 S and PA 8 produced during the dry process are represented towards the via regression calculated undissolved rubber particle amounts in [M.-%]. The calculated approximation formula shows the tendency for the undissolved rubber particle amount in [M.-%] to decrease with softer binder (NP) as well

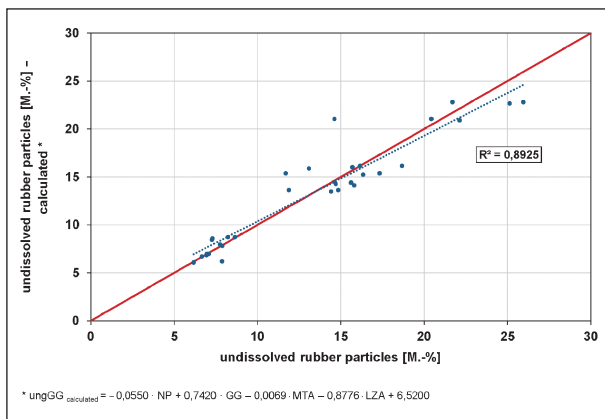


Fig. 2: Regression – undissolved rubber particle amount – complete dry process

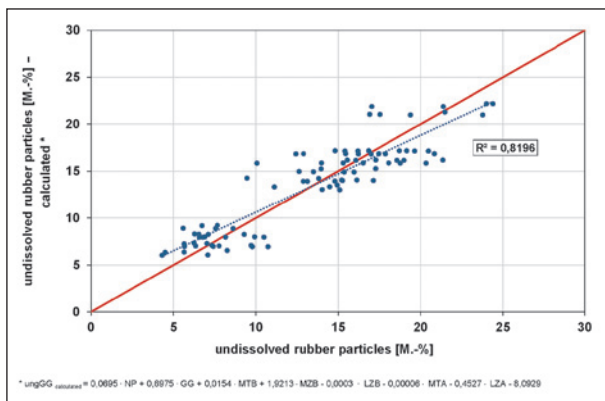


Fig. 3: Regression – undissolved rubber particle amount – complete wet process

as with increasing mixing temperature (MTA) and storage period of the asphalt (LZA).

In figure 3 all determined undissolved rubber particle amounts in [M.-%] of the asphalts SMA 8 S and PA 8 that are produced with the wet process are represented towards the via regression calculated undissolved rubber particle amounts in [M.-%].

The tendency that could be observed for the dry process, cannot be confirmed here. On the basis of the formula it can be ascertained that the undissolved rubber particle amount in [M.-%] increases with softer binder (NP) as well as higher mixing temperature (MTB) and mixing period (MZB) of the bitumen and again drops with increasing mixing temperature (MTA) and storage period (LZA) of the asphalt. The storage period (LZB) of the bitumen is used in the calculation with minimal part.

Besides the determined correlations with useful coefficients of determination of 0.8 to 0.9 in general, the areas of the dosages of the rubber powder can be observed. Furthermore, the figures shows the expected tendency that the amount of undissolved rubber particles in [M.-%] increases with increasing rubber powder amount of 10 M.-% over 20 M.-% to 30 M.-%. However, within the identifiable areas, a substantial fluctuation can be observed.

Based on this analysis it can be established that the production conditions do not have an explicit effect on the extractable binder content resp. the determination of the undissolved rubber particle amount.

Furthermore the midpoint and the range for the undissolved rubber particle amount, based on the dosage of the rubber powder [%] and the binder content without and with rubber particle amount in [M.-%] were gathered to demonstrate the fluctuation of the undissolved rubber particle amount and the linked binder content. Thereby the results of the entire test variations and also the results, separated into modification methods, dry and wet process, and the produced asphalts SMA 8 S and PA 8, are considered.

In table 1 the midpoints and the ranges for the undissolved rubber particles and the binder contents, ascertained with and without rubber particles, summarising for the modification methods dry and wet process for the produced asphalts SMA 8 S and PA 8, are presented. On average the binder contents with rubber particles match the

	wet and dry process SMA 8 S		
	undissolved rubber particle amount, based on the dosage of the rubber powder	binder content without rubber	binder content with rubber
	[%]	[M.-%]	[M.-%]
midpoint	72.7	6.2	7.1
maximum	107.4	7.1	7.7
minimum	43.1	5.3	6.3

Tab. 1: Undissolved rubber particle amount and binder content – wet and dry process SMA 8 S

added content of 7.0 M.-%. The big variance in the values of the binder content without rubber particles is a result of the previously described added rubber powder amounts in the asphalt that have to be considered for the calculation.

Figure 4 represents graphically the frequency of the different rubber particle amounts of 93 extractions on SMA 8 S. The midpoints of the undissolved rubber particles are at 72.7% (SMA 8 S) and 80.1% (PA 8). However big ranges can be identified here too: e.g. an undissolved rubber particle amount of over 100% in the maximum and below 50% in the minimum. On the one side this points to the presence of filler contents in the undissolved rubber particle amounts, but on the other side to rubber particles in the aggregates. Figures 6 and 7 represent the microscope images showing this.

To demonstrate a distribution of the undissolved rubber particle amounts of all 133 extracted asphalts, the midpoint and the corresponding range were determined. The midpoint of the undissolved rubber particles is at 75.0%. It can firstly be noted that 25.0% of the rubber particles get dissolved.

Figure 5 gives an overview of the frequency of the undissolved rubber particles. As expected by the previous interpretations, there is a big range that extends from 43.1% to 107%. Withal the section from 70% to 80% can be identified as the section with the greatest frequency, reflecting also the midpoints of the undissolved rubber particle amounts that were determined during the separate observation according to the modification methods, dry and wet process and the produced asphalts, SMA 8 S and PA 8.

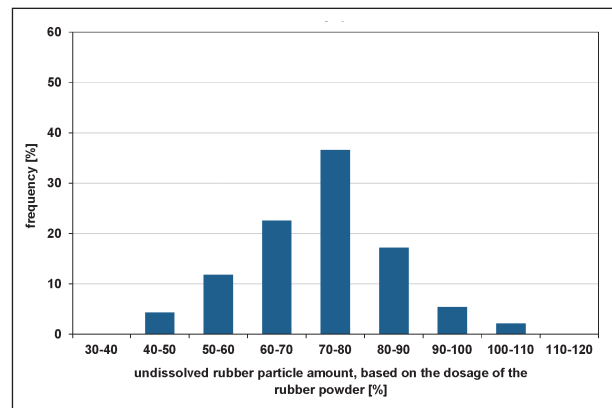


Fig. 4: Frequency distribution of the undissolved rubber particle amount, based on the dosage of the rubber powder – wet and dry process SMA 8 S, N = 93

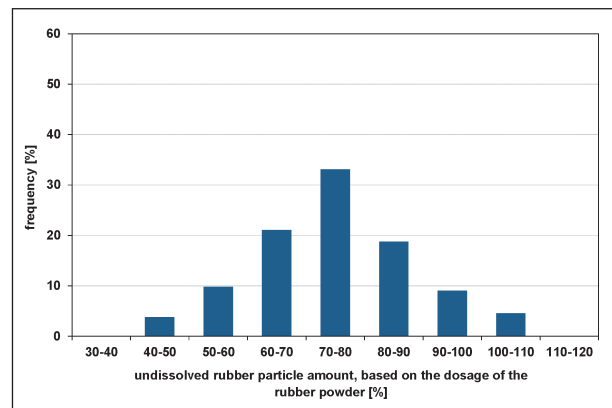


Fig. 5: Frequency distribution of the undissolved rubber particle amount, based on the dosage of the rubber powder – wet and dry process SMA 8 S and PA 8, N = 133

Microscopy

Based on microscopic images of the single extracted components, the difficulties of the extraction of rubber-modified asphalts were documented. It became apparent that on the one side filler content in the decanted undissolved rubber particle amount (figure 6) and on the other side rubber particles in the extracted aggregate mixture (figure 7) can be recovered. This explains the fluctuations regarding the undissolved rubber particle amount. The undissolved rubber particle amount was partly determined with over 100% because the filler contents falsify this value. Inversely the amount can be very minimal because the undissolved rubber particles remained in the aggregate mixture, without being able to separate them granulometrically.

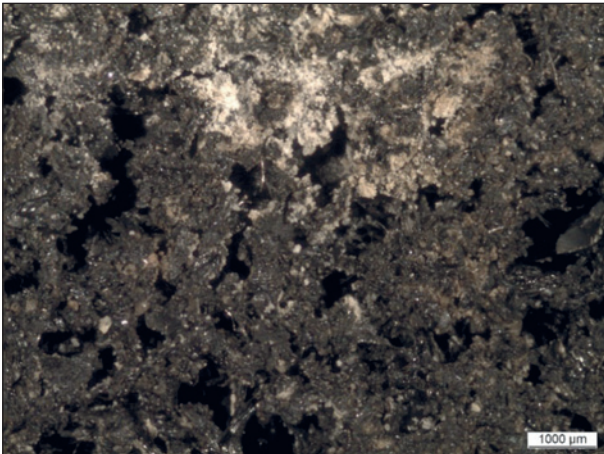


Fig. 6: Filler contents in undissolved rubber particles

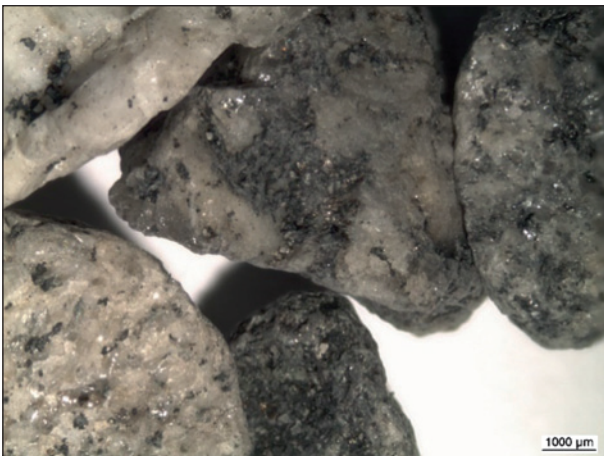


Fig. 7: Rubber particles in aggregates

3.2 Tests with produced rubber-modified bitumen

Rubber-modified bitumen

The rheological characteristics of the rubber-modified bitumen (50/70+20GG) and the effect on the hot storage periods were determined with the dynamic shear rheometer (DSR) in the temperature range between -10 °C and 90 °C. For the analysis of the change of the characteristic binder characteristics as a function of the temperature, the test results are pictured as the complex shear modulus and the phase angle.

Figure 8 represents the complex shear modulus during the entire tested temperature profile. The complex shear modulus describes the stiffness of the binder and thus increases with the viscosity of the binder. Basically the complex shear modulus has a substantial effect on the rubber modification. Relating to the base bitumen the modification

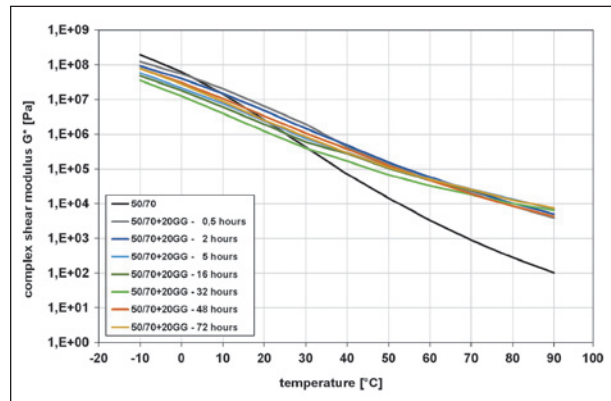


Fig. 8: Complex shear modulus – rubber modified bitumen 50/70+20GG over the temperature range -10 °C to 90 °C

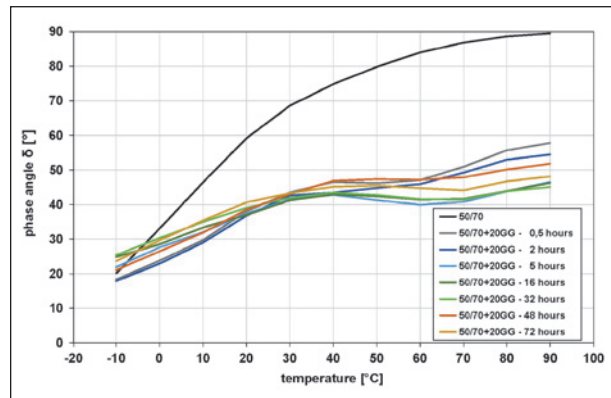


Fig. 9: Phase angle – rubber modified bitumen 50/70+20GG over the temperature range -10 °C to 90 °C

increases the stiffness in the temperature range as from 10 °C to 30 °C. With reduction of the temperature to -10 °C, a decrease of the stiffness proportional to the base bitumen can be observed.

Figure 9 represents the trend of the phase angle of the entire determined temperature profile. Analogous to the complex shear modulus, the elastic amounts, in form of a reduced phase angle, increase with the rubber modification. With the reduction of the temperature, the gap between phase angle of the base bitumen and the modified variant shortens.

With all storage periods the rheological tests indicated that a clear increase of the elastic amounts to the disadvantage of the viscous amounts by comparison to 50/70 has to be achieved. A maximum of the elastification at a storage period of approx. 32 hours was identified.

Undissolved rubber particle amount

To obtain undissolved rubber particle amounts independently from the different dosages, the

hot storage period [h]	undissolved rubber particle amount [M.-%]	undissolved rubber particle amount [%]
0.5	18.1	90
2	17.0	85
5	17.4	87
16	15.6	78
32	16.4	82
48	14.8	74
72	15.4	77

Tab. 2: Undissolved rubber particle amount as a function of the hot storage period

undissolved rubber particle amount was normalized in a further step and was observed in terms of the total rubber granulate amount (e.g. 78.0% rubber particles did not dissolve in the bitumen).

The undissolved rubber particle amount as a function of the hot storage periods is represented in table 2. After 30 minutes hot storage period at 180 °C the amount of undissolved rubber particles reaches 90%. In contrast to that it is at 77% after 72 hours. This amount reflects the determined midpoint of undissolved rubber particles of 75% (cf. chapter 3.1 above) of the asphalt extractions.

Extracted rubber-modified bitumen

The rheological characteristics of the extracted rubber-modified bitumen were determined with the dynamic shear rheometer (DSR) in the temperature range between -10 °C and 150 °C.

Figure 10 represents the complex shear modulus over the entire tested temperature profile. It can be observed that small amounts of undissolved rubber particles interact with the base bitumen and cause a change of the complex shear modulus. Concerning the base bitumen the stiffness in the temperature range from 10 °C to 30 °C increased due to the modification.

With the reduction of the temperature to -10 °C a decrease of the stiffness proportional to the base bitumen is observable. This “flat” course of the curve is typical for elastomer-modified binder.

Considering the results of the extracted binder it becomes apparent that differences can be quantified metrologically, these certainly have no logical order

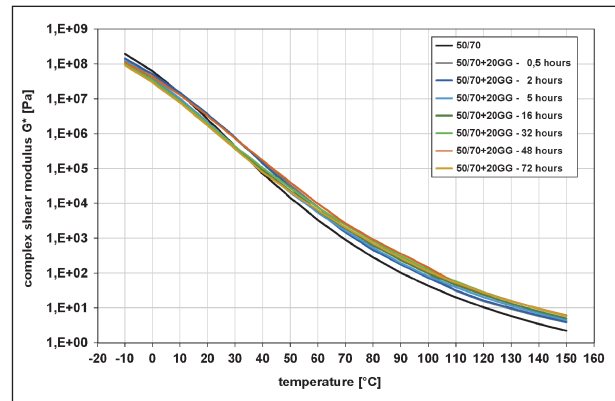


Fig. 10: Complex shear modulus – extracted rubber modified bitumen 50/70+20GG over the temperature range – 10 °C to 150 °C

resp. contradict the order with regard to the hot storage period. On the basis of this tests it can be established that the hot storage period apparently does not have an effect on the undissolved rubber particle amount resp. on the material characteristics of the bitumen.

3.3 Incineration and constructional measure

Because the extraction method according to the [E GmBA, 2012] does not give a sufficiently precise result for the determination of the binder content of rubber modified asphalt, the incineration was tested as an alternative method. This method would exclude the usage of the solvent trichlorethylene and therefore would have advantages with respect to workplace safety. During the incineration the organic part is burned by the thermal stress by means of a muffle furnace. As is known a more or less severely pronounced loss in weight of the aggregate occurs during the provided thermal stress. In order to counter smell and strong smoke emission, the incineration should be performed under a suction outlet.

Figure 11 displays graphically the incineration process of the two essential base materials of the asphalt mixture, i.e. the fresh rubber powder and the fine aggregate diabase 0/2. The thermally induced loss of weight is completed after 60 minutes. The incineration starts at a temperature of 800 °C then raising at 1,000 °C. Consequently an ideal incineration time of 75 minutes at a temperature of 1,000 °C was determined for the following procedure.

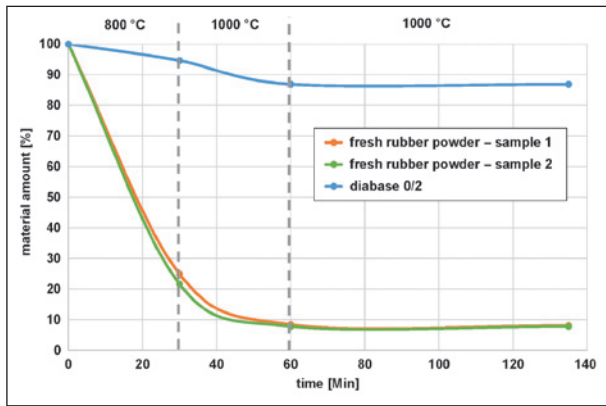


Fig. 11: Incineration of the base materials at different temperatures

Material	material before incineration [%]	material after incineration [%]
filler – limestone	100.0	56.9
0/2 – diabase	100.0	87.0
2/5 – diabase	100.0	94.9
5/8 – diabase	100.0	94.9
fresh rubber powder	100.0	8.0
50/70	100.0	0.0
50/70+15GG	100.0	0.9

Tab. 3: Incineration of the used materials at 1,000 °C

The used materials are burned for 75 minutes and 1,000 °C. Table 3 shows the remaining amounts of the respective grain partition.

The values only apply to the used materials. When using other types of rocks or different rubber powders, the results change. Therefore it is absolutely essential to burn the used base materials separately thus obtaining the pertinent values for further steps.

After the incineration of the base materials and indication of the remaining anorganic amount the binder content is determined with the incineration of asphalt. The incineration as an alternative to the extraction in context of the check test was analysed for the constructional measure.

As a final constructional measure an urban road route was selected. On this route the asphalt surface was renewed under application of rubber-modified binder in the wet process. The asphalt is a noise reducing AC 5 D S LA with a ready-made rubber-modified binder.

	dosages by initial test [M.-%]		amount after incineration [%]	amount in asphalt after incineration [M.-%]
filler (limestone)	11.3	10.5	56.9	6.0
fine aggregates 0/2 mm (diabase)	27.8	25.8	87.0	22.5
coarse aggregates 2/5 mm (diabase)	60.9	56.6	94.9	53.7
binder content		7.1	0.9	0.064
total	100.0	100.0		82.2

Tab. 4: Incineration of the single components of asphalt – AC 5 D S LA

Using the procedure of incineration, the used base materials (aggregates and rubber powder) need to be burned separately for 75 minutes at 1,000 °C in muffle furnace. Because the used material correspond with the previously burned material, the corresponding values of the previous material were accepted.

This step is followed by the incineration of the asphalt for 75 minutes at 1,000 °C in a muffle furnace. To test the effect of different storage periods the asphalt mixture was taken at three different points in time. Three incinerations were done this way. The remaining amounts of the asphalt after incineration for all three asphalts represent approx. 82.5%.

Table 4 shows the aggregate amount and binder amount of initial test at 100%. Table 4 shows further the amounts of the single base materials after incineration. Therewith, the remaining amounts of dosages were determined and summarized. This theoretical calculated percentage amount of 82.2% correlates with the real amount after incineration of the three asphalts (approx. 82.5%).

It can be concluded, that the method of incineration is a useful alternative to the extraction according to [E GmBA, 2012], when the procedural steps are followed.

Procedure of incineration

To detect the binder content of rubber-modified asphalt by incineration during check test effectively, following procedure is recommended:

Initial test

1. Incineration of the used base materials (aggregates and rubber powder) for 75 minutes at 1,000 °C and indication of the remaining anorganic amount.
2. Indication of aggregate amount and binder amount at 100%.
3. Determination and summarization of the remaining amounts of dosages according to the in point 1 determined amounts after incineration.
4. Incineration of the asphalt for 75 minutes at 1,000 °C and indication of the remaining amount for the purposes of comparison.

Check test

5. Knowledge about the initial test.
6. Incineration of the asphalt for 75 minutes at 1,000 °C and indication of the remaining amount.
7. Comparison of the remaining amount with the value determined in initial test (point 4).
8. Determination of the grading curve of the remaining amount and determination of the burned amounts.
9. Offsetting of the real amounts over the remaining asphalt amounts (point 6) and the known remaining amounts of the used aggregates determined in initial test (point 1).
10. Calculation of the binder content via the difference.

In the [E GmBA, 2012] no explicit requirements for the properties of the extracted recovered binder have to be complied to. These requirements are only indicated to gain experience. These characteristics are not relevant for the check test and the quality of rubber-modified asphalt. Concerning this point, a bitumen recovery would not be necessary.

4 Conclusion

Currently, one of main problems when using rubber-modified asphalt is the proper determination of binder content by extraction during check tests

according to [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] and [E GmBA, 2012].

With the extraction of rubber-modified asphalt only parts of rubber powder dissolve in binder, while the undissolved rubber particle remains in aggregate mixtures. For sufficiently precise determination of binder content the undissolved rubber particles have to be recovered precisely. Here, the commonly used procedures using automatic extraction devices reach their limits. According to previous experience the proportion between dissolved and undissolved rubber particles is not constant. This amount mainly fluctuates depending on the rubber powder amount which was added. Further reasons for the occurring fluctuation are the qualities of rubber powder derived from recycling of tyres and their different components. Further imponderables occur with the usage of different rubber powder products with different manufacturer-related additives at the modification of asphalt. It became apparent that on the one hand filler content in the decanted undissolved rubber particle amount and on the other hand rubber particles in the extracted aggregate mixture can be recovered after extraction. This then is a reason for fluctuations regarding the undissolved rubber particle amount.

The production conditions, independently of the wet or dry process, the mixing temperatures and the hot storage periods do not have an explicit effect on the extractable binder content resp. on the determination of the undissolved rubber particle amount.

The main aim of this project was acquiring suggestions and recommendations for defining the determination of rubber-modified asphalt's binder content more precisely to determine the binder content at check tests with sufficient precision. The extraction regarding the [E GmBA, 2012] apparently does not offer a sufficient accurate method for the determination of binder content and content of rubber in rubber-modified asphalt.

Alternatively to the extraction according to [E GmBA, 2012], incineration was applied. The procedure is independent of extraction using trichlorethylen and its related heavy safety regulations. The recommended procedure is described in chapter 3.3 above.

First tests performed within this research project showed plausible and promising results, which must be verified by further tests for optimization and validation.

5 Bibliography

DIN EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007

DIN EN 1427: 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: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Beuth Verlag, Berlin, 2006

E GmBA: Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Köln, 2012

TP Asphalt-StB, Teil 1: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 1: Bindemittelgehalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	15	5.2.1	Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach [E GmBA, 2012].	27
2	Zielsetzung	15	5.2.2	Untersuchungen am hergestellten gummimodifizierten Bitumen	38
3	Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse	15	5.2.3	Veraschung	42
3.1	Bitumenhaltiges Bindemittel.	15	5.3	Baumaßnahmen.	44
3.1.1	Bitumen	15	5.3.1	Baumaßnahmen – Teil 1	44
3.1.2	Modifizierung von Bitumen.	17	5.3.2	Abschlussbaumaßnahme.	45
3.2	Gummimodifizierter Asphalt	17	6	Zusammenfassung und Ausblick . . .	50
3.2.1	Geschichtliche Entwicklung	17		Literatur	52
3.2.2	Herstellung	18		Bilder	53
3.2.3	Bestimmung des Bindemittelgehaltes	19		Tabellen	55
4	Untersuchungsprogramm	20		Anhang	57
4.1	Erkenntnisse aus Baumaßnahmen mit gummimodifizierten Asphalten	20			
4.2	Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes	20			
4.2.1	Zusammensetzung der Asphaltvarianten.	21			
4.2.2	Herstellung der gummimodifizierten Asphalte	22			
4.2.3	Extraktion und Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach [E GmBA, 2012].	23			
4.2.4	Weitere Untersuchungen zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes	24			
4.3	Baumaßnahmen.	26			
5	Untersuchungsergebnisse und -bewertung	27			
5.1	Analyse von ausgeführten Baumaßnahmen mit gummimodifizierten Asphalten	27			
5.2	Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes.	27			

1 Einleitung und Problemstellung

Die Verwendung von gummimodifiziertem Asphalt hat, seit den 1990er Jahren sowohl in den USA als auch in Deutschland, an Bedeutung gewonnen und wird seither zunehmend angewendet. Der Einsatz von gummimodifiziertem Asphalt beschränkt sich in Deutschland bisher primär auf Anwendungen im Offenporigem Asphalt und im Splittmastixasphalt.

Gummimodifiziertes Bitumen stellt bei Einhaltung definierter Verarbeitungsbedingungen eine ressourcenschonende und aufgrund der steigenden Erdölpreise preisgünstige Alternative zu polymermodifizierten Bitumen dar. Ebenso wird durch die Modifizierung von Bitumen mit Gummimehl erwartet, dass hierdurch Gebrauchseigenschaften von Asphalt positiv verändert und optimiert werden können.

Ein noch nicht hinreichend gelöstes Problem bei gummimodifizierten Asphalten besteht jedoch in der Bestimmung des Bindemittelgehaltes durch Extraktion. Bei der Herstellung von gummimodifiziertem Asphalt lösen sich die Gummipartikel nicht vollständig im Bitumen auf. Zudem zeigen die bislang gemachten Erfahrungen, dass das Verhältnis zwischen gelösten und ungelösten Gummipartikelanteilen nicht konstant ist. Der Anteil schwankt u. a. in Abhängigkeit von der Heißlagerungsdauer, der Lagerungstemperatur und dem Gummimehlanteil.

Somit ist eine genaue Erfassung der ungelösten Gummimehlanteile bei der Extraktion momentan nicht möglich und dadurch ebenso keine hinreichend genaue Ermittlung des Bindemittelgehaltes bei Kontrollprüfungen nach den [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007].

2 Zielsetzung

Die Bindemittelgehaltsbestimmung nach den [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] führt bei gummimodifiziertem Asphalt mit den derzeit eingesetzten Extraktionsanlagen zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen.

Daher ist das Ziel des Forschungsvorhabens, Hinweise und Empfehlungen zur Verbesserung der Präzision bei der Bestimmung des Bindemittelgehaltes von gummimodifizierten Asphalten unter Berücksichtigung des ungelösten Gummipartikelanteils zu erarbeiten. Dadurch soll der Bindemittelge-

halt bei einer Kontrollprüfung mit ausreichender Präzision bestimmt werden können.

Der Bindemittelgehalt wird im Rahmen des Projektes durch die Extraktion des Mischgutes mit einem automatisierten Extraktionsgerät bestimmt. Untersucht werden dabei die zwei Asphaltarten Offenporiger Asphalt und Splittmastixasphalt, bei denen die Bedingungen der Gummimodifizierung differieren. Die Herstellung der verschiedenen gummimodifizierten Asphalte erfolgt unter Variation des Grundbitumens und des Gummimehlanteils, wobei die Modifizierung zum Vergleich im Nassverfahren und Trockenverfahren geschieht. Berücksichtigt werden dabei Einflüsse aus Mischtemperatur, Misch- und Lagerungszeit.

Hierzu werden zudem bestehende Strecken, bei denen gummimodifizierte Bitumen und Asphalte eingesetzt wurden, untersucht, um Erkenntnisse über die Genauigkeiten der Bindemittelgehaltsbestimmung zum aktuellen Zeitpunkt zu erlangen.

Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der Einflussparameter auf die Extraktionsergebnisse gummimodifizierter Asphalte. Bei Kenntnis dieser Parameter können entsprechende Vorgaben für die Extraktionsbedingungen gemacht werden, um bauvertraglich hinreichend belastbare Ergebnisse bei den Kontrollprüfungen solcher Asphalte zu ermöglichen.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitete Vorgehensweise zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes von gummimodifizierten Asphalten wird durch baubegleitende Materialuntersuchungen verschiedener Baumaßnahmen verifiziert.

3 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse

3.1 Bitumenhaltiges Bindemittel

3.1.1 Bitumen

Nach der Europäischen Norm zur Terminologie von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemittel [DIN EN 12597, 2001] wird Bitumen als „nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstammiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich“ und „bei Umgebungstemperatur hochviskos oder nahezu fest ist“, definiert.

Bitumenhaltige Bindemittel gehören neben dem seit Anfang der 1980iger Jahren in Deutschland verbotenen Teer und teerhaltigen Bindemittel zu den Kohlenwasserstoff-Bindemitteln. Im Asphaltstraßenbau werden bitumenhaltige Bindemittel, die über Vakuumdestillation aus geeignetem Rohöl gewonnen werden, in Form von Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bitumen eingesetzt. Die Klassifizierung der Bitumensorten in die jeweiligen technischen Anforderungen an diese erfolgt nach den [TL-Bitumen-StB, 2007].

Chemische Zusammensetzung und Struktur

Die chemische Zusammensetzung von Bitumen wird durch die Herkunft und die Art der Herstellung beeinflusst. Das bedeutet auch, dass Bitumen gleicher Sorte unterschiedliche Zusammensetzungen haben können. Bitumen besteht im Wesentlichen aus Kohlenstoff und Wasserstoff sowie geringen Anteilen an Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff. Zusätzlich sind sehr geringe Mengen weiterer Elemente, wie z. B. Nickel, Natrium, Eisen und Vanadium vorhanden [READ; WHITEOAK, 2003].

Die chemische Struktur des Bitumens ist ein Kolloid-System, welches in eine feste, zerstreute (disperse) Phase, die Asphaltene, und eine ölige, kohärente (zusammenhängende), dispergierende Phase, die Maltene, aufgeteilt ist. Die Asphaltene sind mit Erdölharzen als Schutzschicht umgeben und bilden im Kolloidsystem die sogenannten Mizellen [NEUMANN; RAHIMIAN, 1973].

Die Anteile dieser Phasen im Stoffgemisch sind temperaturabhängig. Bei hohen Temperaturen bilden sich kugelförmige, „globuläre“ Mizellen, die durch die Maltene getrennt sind. Dieser Zustand wird als „Sol“-Zustand bezeichnet. Bei niedriger Temperatur nehmen die Mizellen nach Anzahl und Größe zu und es entsteht ein Verbund zwischen den Asphaltene. Dabei wird die Maltenphase eingeschlossen. Dieser Zustand wird als „Gel“-Zustand bezeichnet. Der „Sol“-Zustand bestimmt somit das rheologische Verhalten während der Verarbeitung (flüssig), der „Gel“-Zustand in seiner Gebrauchsphase (fest). Die Übergangsform wird als „Sol-Gel“-Zustand bezeichnet [ZENKE, 1990].

Aus diesem besonderen Aufbau und der kolloidalen Struktur von Bitumen resultieren seine physikalischen und rheologischen Eigenschaften, sowie die Möglichkeiten der Modifizierung z. B. mit Polymeren.

Physikalische und rheologische Eigenschaften

Zur Beurteilung der physikalischen Eigenschaften über den Gebrauchstemperaturbereich kommen verschiedene physikalische Prüfmethode zur Anwendung:

- Brechpunkt nach FRAAß zur Bestimmung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen, also der Übergang vom viskoelastischen zum spröden Aggregatzustand [DIN EN 12593, 2007],
- Nadelpenetration zur Ermittlung des Verhaltens von Bitumen im mittleren Temperaturbereich [DIN EN 1426, 2007] und
- Erweichungspunkt Ring und Kugel zur Bestimmung des Verhaltens von Bitumen bei hohen Temperaturen, also der Übergang vom Grenztemperaturbereich bis zum zähflüssigen Aggregatzustand [DIN EN 1427, 2007].

Mit den oben beschriebenen einfachen Prüfverfahren kann nur das Verhalten bei bestimmten Einzeltemperaturen abgebildet werden. Da sich die Bitumeneigenschaften aber mit der Temperatur kontinuierlich ändern, ist die konventionelle Bitumenprüftechnik nur bedingt geeignet, das Gebrauchsverhalten des Bitumens und die Eigenschaftsverbesserungen durch die Verwendung Polymermodifizierter Bitumen hinreichend differenziert zu erkennen. Daher werden zur Beurteilung dieser Eigenschaften dynamische Prüfverfahren herangezogen. Mit diesen performance-orientierten, rheologischen Prüfverfahren ist es möglich, einen großen Temperaturbereich abzudecken und so das Gebrauchsverhalten in der Praxis besser zu prognostizieren.

Zur Beurteilung des rheologischen Verhaltens von Bitumen werden folgende Verfahren bzw. Geräte verwendet:

- Biegebalkenrheometer (BBR) zur Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen [DIN EN 14771, 2005],
- Kraftduktilitätsprüfung bzw. Formänderungsarbeit zur Beschreibung der Streckeeigenschaften von Bitumen [DIN EN 13589, 2008] bzw. [DIN EN 13703, 2003] und
- dynamische Scherrheometer (DSR) zur Beschreibung des komplexen rheologischen Verhaltens von Bitumen [DIN EN 14770, 2006].

3.1.2 Modifizierung von Bitumen

Nach den [TL Bitumen-StB, 2007] wird bitumenhaltiges Bindemittel grundsätzlich in Straßenbau-bitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen unterschieden. Polymermodifizierte Bitumen sind „mit einem oder mehreren organischen Polymeren modifizierte Bitumen“, wodurch sich das viskoelastische Verhalten des Bitumens verändert. Polymermodifizierte Bindemittel werden zusätzlich in elastomermodifizierte Bitumen (PmB A) und plastomermodifizierte Bitumen (PmB C) gegliedert.

Die Verbesserungen, die durch eine Polymermodifizierung erreicht werden können, lassen sich nach [SCHNEIDER, 1992] folgendermaßen auflisten:

- erhöhte Elastizität,
- bessere Wärmestandfestigkeit,
- besseres Kälteverhalten,
- bessere Haftung am Gestein (Adhäsion),
- bessere Kohäsion,
- besseres Ermüdungsverhalten und
- erhöhte Alterungsresistenz.

Eine wesentliche Veränderung durch Modifikation von Bitumen bzw. Asphalt mit Polymeren liegt in der Plastizitätsspanne. Die Plastizitätsspanne ist der Temperaturbereich zwischen dem Brechpunkt nach FRAAß und dem Erweichungspunkt Ring und Kugel. Durch die Polymermodifizierung wird diese Spanne erweitert. Folglich verbessert sich das Verhalten bei Wärme und bei Kälte. Daraus resultieren eine größere Standfestigkeit im Sommer (weniger Spurrinnenbildung) und eine höhere Sicherheit gegen Rissbildung im Winter [SCHÄFER et al., 2002].

In Bild 1 ist eine Auswahl an geeigneten Polymeren zur Modifikation von Bitumen aufgelistet. Rot dargestellt sind häufig verwendete, typische Polymere. In dem Bereich der Elastomere ist auch die Verwendung von Gummimehl und -granulat einzuordnen, wobei diese Polymere im Allgemeinen aus Altreifen gewonnen werden und damit ein sehr komplexes Polymergemisch beinhalten.

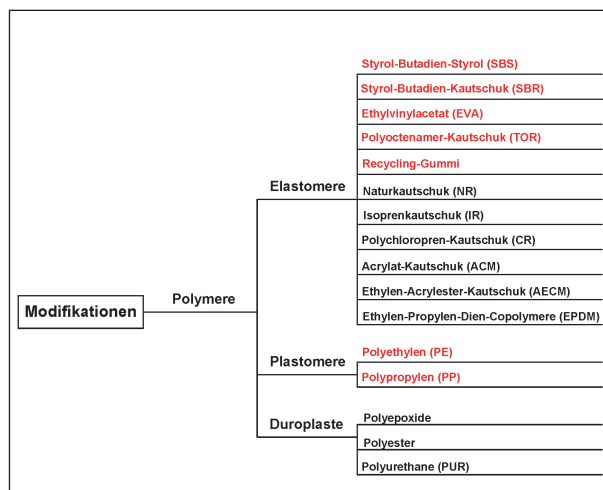


Bild 1: Polymergruppen

3.2 Gummimodifizierter Asphalt

3.2.1 Geschichtliche Entwicklung

In den USA wurde der Einsatz von Altreifengummi im Asphalt bereits in den 1950er Jahren mit dem Ziel, die Dauerhaftigkeit einer Straßenoberfläche durch die Flexibilität des Gummis zu erhöhen, untersucht. Diese ersten Versuche schlugen jedoch fehl, da eine kürzere Lebensdauer im Vergleich zu konventionellen Asphalten erreicht wurde.

In den 1960er Jahren kam Charles H. McDONALD auf den gummimodifizierten Asphalt (asphalt-rubber) zurück, um damit die Schlaglöcher in Arizona auszubessern. Die Neuerung bestand darin, das Gummi und Bitumen sorgfältig zu durchmischen und anschließend 45 bis 60 Minuten reagieren zu lassen. Dadurch konnten verbesserte Materialeigenschaften festgestellt werden.

1975 wurde Gummi erstmals erfolgreich im Heißasphalt verwendet. 1988 veröffentlichte die „American Society for Testing and Materials (ASTM)“ die erste einheitliche Definition von Gummi-Bitumen. Demnach betrug der Anteil des Gummis mindestens 15 M.-% und es musste eine Reaktionszeit von mindestens 45 Minuten gewährleistet werden.

Aufgrund von vermuteten gesundheitsgefährdenden Emissionen, kostenintensiven Maschinenmodifizierungen und erhöhten Preisen von gummimodifizierten Asphalt zu konventionellen Asphalten, wurde jedoch bis in die 1990er Jahre Asphalt mit gummimodifiziertem Bitumen selten eingebaut [CARLSON; ZHU, 1999].

Die Entwicklung in Deutschland ist vergleichbar. In den 1950er Jahren wurden erste Empfehlungen für die Verwendung von Gummi im Straßenbau formuliert. Erste Untersuchungen zeigten eine Verringerung der Temperaturempfindlichkeit und eine Erweiterung des Plastizitätsbereiches. Zudem erzielte das Bindemittel verbesserte elastische Eigenschaften. So wurde mit Versuchen nachgewiesen, dass durch vulkanisierten Kautschuk die Streckbarkeit verbessert wird und durch den Zusatz von Gummimehlen speziell die Druckelastizität gesteigert wird [SCHMIDT, 1953].

Zurzeit wird gummimodifiziertes Bitumen in Deutschland vor allem in Deckschichten aus Offener Asphalt (PA) oder Splittmastixasphalt (SMA) verwendet [FGSV, 2003].

3.2.2 Herstellung

Materialrecycling

Neben den zuvor genannten Vorteilen durch die Polymermodifizierung tritt bei gummimodifizierten Asphalten der Recyclinggedanke in den Vordergrund. Meist wird das Gummimehl bzw. -granulat aus Pkw- und Lkw-Altreifen gewonnen.

Neben Gummi bestehen Altreifen aus Stahl und Textilfasern. Um diese voneinander zu trennen, sind in der Regel drei Zerkleinerungsprozesse (Vorzerkleinerung, Granulierung und Feinvermahlung) erforderlich. Zwischen diesen Prozessen werden die Stahldrähte, Textilfasern und Fremdstoffe entfernt.

Für die Aufbereitung auf die gewünschte Korngröße existieren zwei Verfahren, die ambiente Vermahlung (Warmvermahlung) und die kryogene Vermahlung (Kaltvermahlung). Bei Ersterem wird das Material bei Umgebungstemperatur zerkleinert, während bei der kryogenen Vermahlung die vorzerkleinerten Reifenstücke mit flüssigen Stickstoff abgekühlt werden, um ein Verspröden und damit ein besseres Brechen des Materials zu erreichen [RESCHNER, 2012].

Die hauptsächlichen Bestandteile des Gummimehles bzw. -granulates sind Synthetikgummi mit Anteilen aus Naturkautschuk, Schwefel, Füllstoffen (Ruß, Silicate). Weiterhin enthält Gummimehl bzw. -granulat in geringen Mengen Weichmacher (Mineralöl, o. Ä.), Beschleuniger (Xanthogenate, Thiazole, Amin-Derivate), Aktivatoren (Zinkoxid) und Alterungsschutz. Dabei variiert die Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Reifenart (Pkw- und

Lkw-Reifen, Sommer- und Winterreifen) und vom Hersteller [FGSV, 2003].

Reaktionsablauf bei der Gummimodifikation

Bei der Vermischung von heißem Bitumen mit Gummimehl findet eine sogenannte Bitumen-Gummi-Interaktion zwischen den beiden Stoffen statt. Dabei lösen die leichter flüchtigen Maltene aus der Bitumenphase den Elastomeranteil der Gummipartikel an, was wiederum zu einem Aufquellen der Gummipartikel bis zur doppelten Größe führen soll. Durch den Quellvorgang entsteht in der Bitumenmatrix ein Gel aus Elastomeren, Asphaltenen und Maltenen mit einem verbleibenden Teil der ursprünglichen Gummipartikel.

Um das Fortschreiten der Reaktion abzuschätzen und zu beurteilen, wird der Viskositätsverlauf herangezogen. Mit zunehmender Reaktionszeit erhöht sich die Viskosität. Bei zu langer Reaktionszeit kommt es allerdings zu einer Depolymerisation, einer Zerstörung des Gummis, und die Viskosität vermindert sich wieder [SCHINKINGER, 2004], [ABDELRAHMAN, 2006].

Der Verlauf der Bitumen-Gummi-Interaktion vom Quellvorgang bis hin zur Depolymerisation wird in Abhängigkeit von der Zeit und unter Einwirkung einer konstant hoch gehaltenen Temperatur in Bild 2 dargestellt.

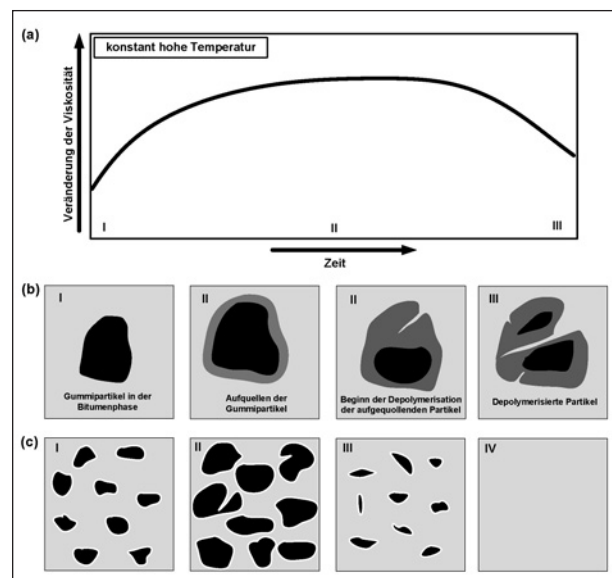


Bild 2: Verlauf der Bitumen-Gummi-Interaktion bei hohen Temperaturen: (a) Veränderung der Viskosität, (b) Veränderung der Partikelgröße und (c) Veränderung der Bitumenmatrix in Anlehnung an [ABDELRAHMAN, 2006]

Modifizierungsverfahren

Nach den „Empfehlungen zu gummimodifizierten Bitumen und Asphalten“ [E GmBA, 2012] wird bei der Herstellung von gummimodifizierten Bitumen und Asphalten prinzipiell zwischen Nass- und Trockenverfahren unterschieden.

Bei dem Nassverfahren wird das Gummimehl bzw. -granulat inklusive eventueller Additive dem Bitumen bei einer Temperatur von ca. 180 °C vor dem Mischen des Asphaltes beigemischt. Zur Reifung – dem Quellprozesses der Gummipartikel – sollte das Gummi-Bitumen-Gemisch für ca. ein bis zwei Stunden in einem Rührwerkstank gelagert werden. Das so hergestellte gummimodifizierte Bitumen ist nur bedingt lagerstabil und sollte daher zeitnah verarbeitet werden. Bei dem Mischvorgang zum Asphalt darf eine maximale Mischtemperatur von 170 °C nicht überschritten werden.

Bei dem Trockenverfahren wird das Gummimehl bzw. -granulat inklusive eventueller Additive während des Mischvorganges, noch vor dem Bitumen, dem Asphalt bei einer maximalen Mischtemperatur von 170 °C zugegeben. Somit findet keine Modifikation des Bitumens statt, sondern eine direkte Modifikation des Asphaltes. Die Reifezeit kann bei diesem Verfahren nicht ausschließlich durch den Mischvorgang sichergestellt werden, daher muss sich eine ausreichende Lagerungszeit im Mischgut-silo von ca. einer Stunde anschließen.

Bild 3 gibt einen Überblick über den Ablauf der beiden Modifizierungsverfahren.

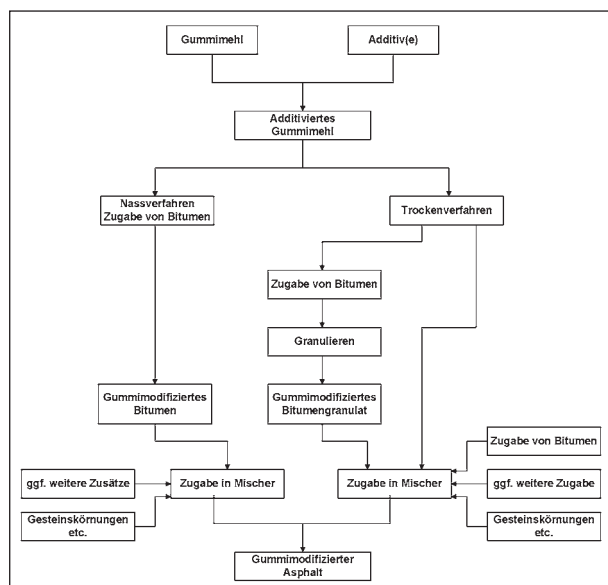


Bild 3: Begriffe bei der Modifizierung von Bitumen und Asphalt mit Gummimehl bzw. -granulat [E GmBA, 2012]

Um die Eigenschaften des gummimodifizierten Asphaltes zu verbessern, können Additive eingesetzt werden. Nach den [E GmBA, 2012] sind zurzeit folgende Additive bekannt:

- Öle, sollen das Anlösen und Quellen des Gummimehles (Reifeprozess) erleichtern.
- Polymere, sollen die Verarbeitbarkeit verbessern und das Anhaften am Arbeitsgerät verhindern.
- Viskositätsverändernde Zusätze, sollen die Temperatur absenken und/oder die Verarbeitungsfähigkeit verbessern.

3.2.3 Bestimmung des Bindemittelgehaltes

Die Bestimmung des Bindemittelgehaltes durch Extraktion führt bei gummimodifizierten Asphalten zu labortechnischen Problemen. Das Verfahren nach den [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] ist nicht anwendbar, da das bei der Extraktion rückgewonnene Bindemittel nur die gelösten Gummimehlanteile enthält. Die ungelösten Gummipartikel finden sich im Gesteinskörnungsgemisch wieder.

Nach [FGSV, 2003] werden zur Bestimmung des Gehaltes an Bitumen und Gummimehl folgende verschiedene Verfahren eingesetzt:

1. Berücksichtigung des Anteils an ungelösten Gummibestandteilen durch Einführung eines empirischen Faktors (übliche Praxis: Bindemittelgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] plus 10 M.-% bis 15 M.-%, relativ).
2. Entnahme von Proben des gummimodifizierten Bitumens während der Verarbeitung an der Mischanlage und Zuordnung zu den jeweiligen Prüfabschnitten. Bestimmung des ungelösten Gummipartikelanteils durch Extraktion mit Trichlorethylen, welcher als Zuschlag für den ungelösten Anteil bei der Bestimmung des Gehaltes an Bitumen und Gummi berücksichtigt wird.
3. Bestimmung der in Trichlorethylen ungelösten Gummipartikelanteile in der Gesteinskörnung durch Dichtentrennung, z. B. mit einer Zinkchlorid-Lösung.

Nach [SABITA, 2009] wird in Südafrika der Anteil der ungelösten Gummipartikel ebenfalls nach dem zweiten Verfahren berücksichtigt. Der Korrekturfaktor wird wie folgt berechnet:

$$f = \frac{\text{Masse des Bitumen und der Gesteinskörnung}}{\text{Masse des in der Extraktion ausgewaschenen Bitumens}}$$

[GOGOLIN, 2012] führte in Anlehnung an das zweite Verfahren Untersuchungen zur Bestimmung des gelösten Gummipartikelanteils im Bindemittelgemisch durch. Dabei wurden drei Straßenbaubitumen (50/70, 70/100 und 160/220) mit Gummimehl (10 M.-% bis 30 M.-%) bei einer Temperatur von 180 °C 30 Minuten gemischt und für eine Stunde heiß gelagert.

In Vorversuchen wurde die Löslichkeit des verwendeten Ausgangsgummimehles durch das Lösemittel Trichlorethylen ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Löslichkeitsuntersuchungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die [E GmBA, 2012] geben zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes von gummimodifiziertem Asphalt eine detaillierte Vorgehensweise unter Berücksichtigung von Arbeitsschutzmaßnahmen wie Schutzausrüstung und Laborabzug vor. Dabei wird der ungelöste Gummipartikelanteil über das sogenannte Dekantierverfahren erfasst. Dies bedeutet, dass das Asphaltmischgut, nachdem es in Trichlorethylen gelöst wurde, über ein Analysensieb dekantiert wird, um so die ungelösten Gummipartikel aufzufangen. Das restliche Asphaltmischgut wird entsprechend den [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] extrahiert. Aus der Summe des rückgewonnenen Bindemittels (löslicher Bindemittelgehalt), der Masse an Gummipartikeln und des Unlöslichen errechnet sich der Gesamtbindemittelgehalt.

4 Untersuchungsprogramm

4.1 Erkenntnisse aus Baumaßnahmen mit gummimodifizierten Asphalten

Durch eine Recherche wurden Baumaßnahmen ausgewertet, bei denen gummimodifizierte Bitumen eingesetzt wurden. Diese Baumaßnahmen sollten möglichst beide Modifizierungsverfahren (Nass- und Trockenverfahren) abdecken.

Bei diesen Baumaßnahmen wurden zum einen die Vorgehensweise und Erfahrungen mit gummimodifizierten Bitumen und Asphalten analysiert und zum anderen die Erstprüfungen bzw. Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen speziell hinsichtlich des variierenden Bindemittelgehaltes ausgewertet. Zur genauen Analyse wurde zusätzlich abgefragt, ob und in welcher Form der Anteil an ungelösten Gummipartikeln berücksichtigt wurde.

4.2 Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes

Für die Bestimmung des Gehaltes gummimodifizierten Bindemittels durch Extraktion wurden die zwei Asphaltarten Splittmastixasphalt (SMA) und Offenporiger Asphalt (PA) näher untersucht. Die Gummimodifizierung des Asphaltes wurde vergleichend im Nass- und Trockenverfahren durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf der Modifizierung mit dem Nassverfahren lag.

Als Grundbitumen wurden die Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 und 70/100 ausgewählt. Die Gum-

Grundbitumen	Anteil Gummi [M.-%]	Gelöster Gummipartikelanteil [%]				
		Probe A	Probe B	Probe C	Mittelwert	Standardabweichung
50/70	10	16,9	16,6	17,1	16,9	0,25
	15	17,2	16,7	18,1	17,3	0,71
	20	17,9	19,8	18,5	18,7	0,97
70/100	10	18,5	18,1	19,2	18,6	0,56
	15	19,0	19,8	20,1	19,6	0,57
	20	19,8	20,2	18,9	20,0	0,67
160/220	15	20,2	20,8	19,5	20,5	0,65
	20	19,6	21,1	20,5	20,4	0,75
	30	20,1	20,7	19,2	20,0	0,75

Tab. 1: Bestimmung des gelösten Gummipartikelanteils im Bitumen-Gummimehl-Gemisch

mimehlanteile variierten mit 10 M.-%, 20 M.-% und 30 M.-% bezogen auf den Bindemittelgehalt. Ein Bindemittelträger war in diesem Fall nicht relevant, da das Gummimehl diese Funktion übernimmt. Das Gummimehl wurde in der Körnung 0,2 mm bis 0,8 mm verwendet. Für die Modifikation wurde zusätzlich der Vernetzer (Polyoctenamer) mit einem Anteil von 4,5 M.-% bezogen auf das Gummimehl, eingesetzt.

Die Gummimodifizierung des Bitumens umfasste neben dem eigentlichen Rühr- und Modifizierungsvorgang einen zusätzlichen Reifevorgang bzw. Quellprozess der Gummipartikel. Um den Einfluss dieser Bedingungen auf die Bestimmung des Bindemittelgehaltes nachvollziehen zu können, wurden die Mischtemperatur, Misch- und Lagerungszeit variiert.

Neben den unterschiedlich im Labor hergestellten gummimodifizierten Bitumen wurde zusätzlich ein gummimodifiziertes Fertigbindemittel ausgewählt. Die Herstellung des Asphaltmischgutes erfolgte sowohl im Nass- als auch im Trockenverfahren unter Variation der Mischtemperatur und der Lagerungszeit.

Bild 4 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Untersuchungsvarianten.

Des Weiteren wurden mit Extraktionsanlagen zweier Hersteller, die sich zum Zeitpunkt der Laboruntersuchungen mit der Automatisierung der Extraktion von gummimodifizierten Asphalt beschäftigten, vergleichende Untersuchungen durchgeführt.

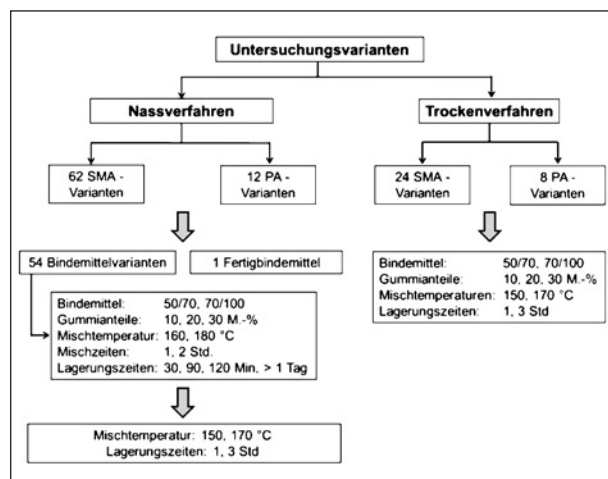


Bild 4: Untersuchungsvarianten

4.2.1 Zusammensetzung der Asphaltvarianten

Zur Herstellung der Asphaltproben für die Laboruntersuchungen wurden stets die gleichen Ausgangsmaterialien verwendet. Einflüsse unterschiedlicher Gesteins- oder Bitumenqualitäten auf die Zielstellung dieses Projektes wurden dadurch vermieden. Als Füller wurde jeweils ein für den Straßenbau übliches Kalksteinmehl 90/10 eingesetzt. Die feine Gesteinskörnung ist ein gebrochener Diabas, für die grobe Gesteinskörnung wurde ebenso Diabas verwendet.

Aus den genannten Baustoffen wurden entsprechend den Anforderungen der [TL Asphalt-StB, 2007] die zwei verschiedenen, in der Baupraxis gebräuchlichen Asphaltarten hergestellt:

- SMA 8 S und
- PA 8.

Mit der Zielsetzung, den Einfluss des Gummimehles im Bindemittel bzw. Asphalt durch unterschiedliche Herstellungsbedingungen auf den Bindemittelgehalt zu untersuchen, wurden sowohl der Bindemittelgehalt, als auch die Gesteinskörnungszusammensetzung (Kornverteilungslinie) innerhalb einer Asphaltmischgutart konstant gehalten.

In Tabelle 2 und 3 sind die verwendeten Gesteinsarten, die Zusammensetzung der Gesteinskörnung, die Bindemittelgehalte und die Rohdichte

Asphaltkonzept	SMA 8 S	
Gesteinsart		
Füller	Kalksteinmehl	
Feine Gesteinskörnung 0/2	Diabas	
Grobe Gesteinskörnung 2/5, 5/8	Diabas	
Zusammensetzung der Gesteinskörnung		
Anteil Füller	[M.-%]	10
Anteil feine Gesteinskörnung 0/2	[M.-%]	15
Anteil grobe Gesteinskörnung 2/5	[M.-%]	15
Anteil grobe Gesteinskörnung 5/8	[M.-%]	60
Bindemittel		
Bindemittelart	variabel	
Bindemittelgehalt	[M.-%]	7,0
Mischgut		
Rohdichte	[g/cm ³]	2,511

Tab. 2: Zusammensetzung des hergestellten SMA 8 S gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

Asphaltkonzept		PA 8	
Gesteinsart			
Füller	Kalksteinmehl		
Feine Gesteinskörnung 0/2	Diabas		
Grobe Gesteinskörnung 2/5, 5/8	Diabas		
Zusammensetzung der Gesteinskörnung			
Anteil Füller	[M.-%]	4	
Anteil feine Gesteinskörnung 0/2	[M.-%]	4	
Anteil grobe Gesteinskörnung 2/5	[M.-%]	2	
Anteil grobe Gesteinskörnung 5/8	[M.-%]	90	
Bindemittel			
Bindemittelart			variabel
Bindemittelgehalt	[M.-%]	6,5	
Mischgut			
Rohdichte	[g/cm³]	2,834	

Tab. 3: Zusammensetzung des hergestellten PA 8 gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

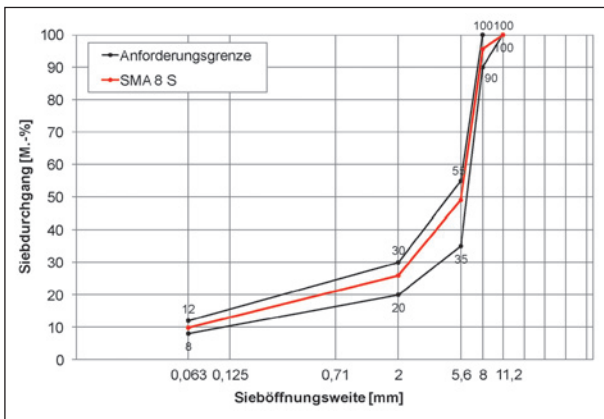


Bild 5: Korngrößenverteilung des hergestellten SMA 8 S inklusive der Anforderungsgrenzen gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

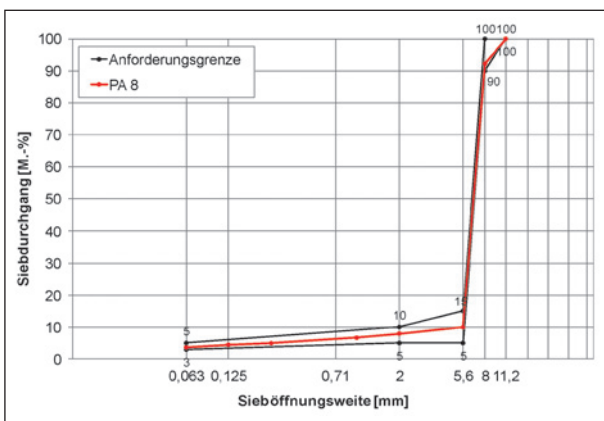


Bild 6: Korngrößenverteilung des hergestellten PA 8 inklusive der Anforderungsgrenzen gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

SMA 8 S			
Gummimehlanteil im Bitumen	Gesamtbindemittelgehalt im Asphaltmischgut	Bitumenanteil im Asphaltmischgut	Gummimehlanteil im Asphaltmischgut
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
10	7,0	6,3	0,70
20	7,0	5,6	1,40
30	7,0	4,9	2,10

Tab. 4: Bindemittel- und Gummimehlanteile im Asphaltmischgut des hergestellten SMA 8 S

PA 8			
Gummimehlanteil im Bitumen	Gesamtbindemittelgehalt im Asphaltmischgut	Bitumenanteil im Asphaltmischgut	Gummimehlanteil im Asphaltmischgut
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
10	6,5	5,9	0,65
20	6,5	5,2	1,30
30	6,5	4,6	1,95

Tab. 5: Bindemittel- und Gummimehlanteile im Asphaltmischgut des hergestellten PA 8

des Mischgutes zusammengefasst. Ergänzend sind in den Bildern 5 und 6 die Korngrößenverteilungen der Asphalte sowie deren Grenzen gemäß den [TL Asphalt-StB, 2007] dargestellt.

Die Bindemittelgehalte von 7,0 M.-% bei dem SMA 8 S und 6,5 M.-% bei dem PA 8 verstehen sich inklusive dem Gummimehlanteil von 10 M.-%, 20 M.-% oder 30 M.-%. So hat z. B. ein SMA 8 S mit dem Bindemittel 70/100 und 30 M.-% Gummimehl bezogen auf das Asphaltmischgut einen reinen Anteil 70/100 von 4,9 M.-% und einen Gummimehlanteil von 2,1 M.-%. Die Tabellen 4 für den SMA 8 S und Tabelle 5 für den PA 8 geben einen detaillierten Überblick über die Bindemittel- und Gummimehlanteile im Asphaltmischgut.

4.2.2 Herstellung der gummimodifizierten Asphalte

Die Herstellung von gummimodifizierten Bitumen bzw. Asphalten erfolgte einerseits im Nassverfahren und andererseits im Trockenverfahren.

Nassverfahren

Im Nassverfahren wurde das Gummimehl dem Straßenbaubitumen vor dem Mischen des Asphalttes beigemischt. Als Einmischtechnik kam hier der in Bild 7 skizzierte Flügelrührer zum Einsatz. Das Bindemittelgemisch wurde dann unter variierender Mischtemperatur bei 200 Umdrehungen/Minute gerührt. Zu Beginn wurde der Vernetzer ca. 10 Minuten lang eingerührt. Anschließend erfolgte die Zugabe des Gummimehles langsam und in kleinen Teilmengen. Zur Reifung – dem Quellprozess der Gummipartikel – wurde das Gummi-Bitumen-Gemisch für unterschiedliche Zeiten heiß gelagert.

Da das entstandene gummimodifizierte Bitumen nicht lagerstabil war, musste es nach Abschluss der Heißlagerungszeit und vor Verarbeitung zum Asphalt mit dem Rührwerk kurz homogenisiert werden. Die Herstellung des Asphaltmischgutes erfolgte nach individuellen Vorgaben (siehe Bild 4) und den [TP Asphalt-StB, Teil 35, 2007].

Trockenverfahren

Bei dem Trockenverfahren wurde das Gummimehl während des Mischvorganges, noch vor dem Bitumen, dem Asphalt zugegeben. Somit fand keine Modifikation des Bitumens statt, sondern eine direkte Modifikation des Asphalttes.

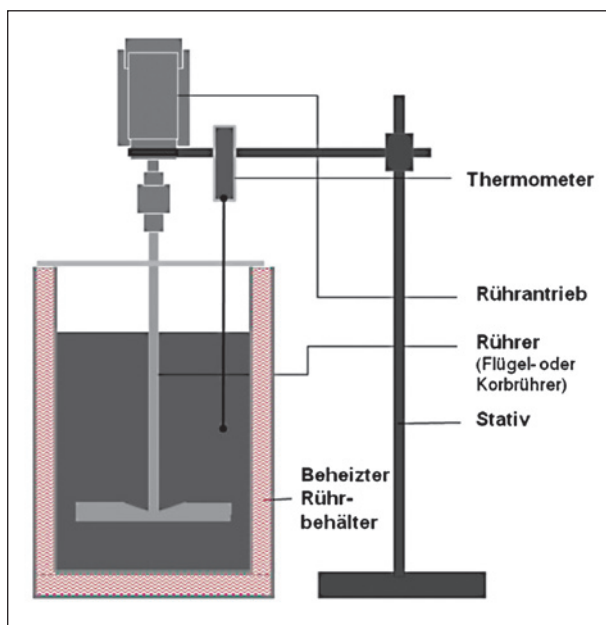


Bild 7: Geräteskizze zur Herstellung von gummimodifizierten Bitumen aus Straßenbaubitumen und Gummimehl [E GmBA, 2012]

4.2.3 Extraktion und Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach [E GmBA, 2012]

Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes mit dem Extraktionsgerät orientierte sich zunächst an den [E GmBA, 2012]. Demnach wurde wie folgt vorgegangen:

- Die Mischgutprobe wurde in einem Becherglas für 4 Stunden in frischem Trichlorethylen bei Raumtemperatur angelöst.
- Das Mischgut wurde mit einem Glasstab 30 Sekunden umgerührt. Dabei schwamm ein Teil der nicht gelösten Gummipartikel auf.
- Das Bindemittel-Lösemittelgemisch einschließlich der Gummipartikel wurde über einem Sieb 0,125 mm dekantiert und in einem Gefäß aufgefangen.
- Das Becherglas wurde erneut mit frischem Trichlorethylen gefüllt und erneut mit einem Glasstab 30 Sekunden gerührt, um restliche ungelöste Gummipartikel aus dem Asphaltmischgut im Becherglas zu erfassen.
- Das Bindemittel-Lösemittelgemisch einschließlich der Gummipartikel wurde erneut über dem Sieb 0,125 mm dekantiert. Auf dem Sieb verblieben die ungelösten Gummipartikel.
- Das Sieb inklusive Rückstand wurde bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet und der Siebrückstand nach dem Abkühlen durch Wiegen ermittelt. Der Siebrückstand ergab die Masse der ungelösten Gummipartikel.
- Der Inhalt des Becherglases und das aufgefangene Bindemittel-Lösemittelgemisch wurden in die Extraktionsanlage gegeben und entsprechend [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] extrahiert.

Der Gesamtbindemittelgehalt errechnete sich danach aus der Summe des rückgewonnenen Bindemittels (löslicher Bindemittelgehalt), der Masse an ungelösten Gummipartikeln und des Unlöslichen.

Grundsätzlich ist bei Tätigkeiten mit dem Lösemittel Trichlorethylen der Arbeitsschutz zu beachten. Sowohl die beschriebene, manuelle Probenvorbereitung als auch die anschließende Extraktion fand unter Abzug und Lüftung statt. Gegebenenfalls ist persönliche Schutzausstattung zu tragen (z. B. Atemschutzmaske).

Mikroskopie

Die mittels Extraktion trennbaren Asphaltkomponenten wurden nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ erfasst, um gegebenenfalls Ursachen für schwankende Anteile zu ergründen.

Dazu wurden die nach dem Extraktionsvorgang ungelösten Gummipartikel und die extrahierten Gesteinskörnungen mikroskopisch untersucht, um Schwierigkeiten bei der vollständigen Rückgewinnung der ungelösten Gummipartikel nachzuweisen und auch eventuelle Unterschiede hinsichtlich der variierenden Herstellungsbedingungen konkreter zu erkennen.

4.2.4 Weitere Untersuchungen zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes

Untersuchungen am hergestellten gummimodifizierten Bitumen

Neben den beschriebenen Asphaltextraktionen wurde eine zusätzliche Untersuchungsreihe zur Extraktion von reinem gummimodifizierten Bitumen durchgeführt, um den grundsätzlichen Einfluss verschiedener Heißlagerungszeiten zu untersuchen. Dabei wurde ein Straßenbaubitumen 50/70 mit 20 M.-% Gummimehl gemischt und anschließend bei einer Temperatur von 180 °C gelagert. Folgende Heißlagerungszeiten wurden dabei gewählt:

Untersuchungsmethode	Vorschrift/Norm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	[DIN EN 1427, 2007]
Nadelpenetration	[DIN EN 1426, 2007]
Dynamisches Scherrheometer	[DIN EN 14770, 2006]

Tab. 6: Durchgeführte Untersuchungen an den extrahierten Bindemittelvarianten

- 0,5 Stunden,
- 2 Stunden,
- 5 Stunden,
- 16 Stunden,
- 32 Stunden,
- 48 Stunden,
- 72 Stunden.

Als Modifikator wurde ein Gummimehl in der Körnung 0,2 mm bis 0,8 mm verwendet, wobei zusätzlich für die Modifikation ein Vernetzer (Polyoctenamer) mit einem Anteil von 4,5 M.-% bezogen auf das Gummimehl, eingesetzt wurde.

Nach der Herstellung der gummimodifizierten Bitumen wurden diese mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR) auf ihr rheologisches Verhalten überprüft.

Weiterhin wurden die gummimodifizierten Bitumen mit Trichlorethylen extrahiert, indem das Bindemittel-Lösemittel-Gemisch über ein 0,09 mm Sieb dekantiert wurde und die ungelösten Gummipartikel erfasst wurden. Zur Untersuchung, inwiefern sich die Heißlagerungszeiten und die eventuell gelösten Gummipartikel auswirken, wurden an den extrahierten rückgewonnenen gummimodifizierten Bindemitteln die in Tabelle 6 aufgelisteten Prüfungen durchgeführt.

Die verwendeten Prüfparameter der DSR-Prüfungen sowohl für die gummimodifizierten Bitumen als auch für die extrahierten gummimodifizierten Bitumen sind in Tabelle 7 dargelegt.

	Gummimodifizierte Bitumen	Extrahierte gummimodifizierte Bitumen
Messsystem	Platte/Platte	Platte/Platte
Prüfart	weggesteuert/oszillierend	weggesteuert/oszillierend
Vorgegebene Deformation	0,5 bis 10,0 %	0,5 bis 10,0 %
Prüftemperaturbereich	-10 bis 90 °C	-10 bis 150 °C
Prüfintervalle	10 °C	10 °C
Prüffrequenzen	1,59 Hz	1,59 Hz
Zeit der Temperierung zwischen den Prüfintervallen	15 min	15 min
Probendurchmesser	8 mm	8 mm
Spaltbreite	2 mm	1 mm

Tab. 7: Prüfparameter zur Bestimmung der rheologischen Bitumenkennwerte mit dem DSR

Kaltextraktion mit Methylester als Lösemittel

Zurzeit wird als Lösemittel Trichlorethylen zur Extraktion von Asphalt verwendet. Aufgrund der jedoch voraussichtlich bevorstehenden Substitution von Tri, wurde das alternative Lösungsmittel Kokosfettsäuremethylester (kurz: KME, Handelsbezeichnung: Pernil ME C 6-10 HD) mit in die Untersuchungen einbezogen.

Dazu wurde ein im Nassverfahren hergestellter SMA 8 S mit dem Bindemittel 50/70 und 10 M.-% Gummimehl im Kaltextraktionsverfahren mit KME wieder in seine einzelnen Bestandteile getrennt.

Aufgrund der Geruchsauffälligkeit des Lösemittels musste auch diese Kaltextraktion in einem Abzugsschrank durchgeführt werden. Bei diesen ersten Tastversuchen wurde auf die Rückgewinnung des Bindemittels und die präzise Trennung von Bindemittel und Füller verzichtet.

Grundsätzlich wurde bei diesem Verfahren so vorgegangen, dass das granuliert gummi-modifizierte Asphaltmischgut für einen Tag in KME angelöst wurde. Danach wurde solange gemischt, bis das Bindemittel von der Gesteinskörnung augenscheinlich abgelöst war.

Das Gemisch aus Bindemittel, Lösemittel und Füller wurde anschließend von der übrigen Gesteinskörnung inklusive der ungelösten Gummipartikel durch Dekantieren getrennt. Dabei wurde die überstehende Bindemittellösung durch einen Siebturm mit den Siebgrößen 0,063 mm, 0,125 mm, 2,0 mm, 5,6 mm und 8,0 mm in ein Vorratsgefäß dekantiert. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis das Lösemittel farblos abfloss. Gleichzeitig wurden schon im ersten groben Schritt die Gesteinskörnungen in ihre Kornklassen getrennt.

Das Gemisch aus Bindemittel und Lösemittel und der Füller wurden separat über Filterpapier voneinander getrennt. Das Gesteinskörnungsgemisch und der übriggebliebene Füller wurden danach mit warmen Wasser und Geschirrspülmittel zur Entfernung der öligen Anteile ausgewaschen und anschließend bis zur Massekonstanz bei 100 °C getrocknet. An den trockenen Gesteinskörnungen kann im Weiteren die Kornverteilungslinie bestimmt werden.

Die Dichte von KME beträgt 0,8 g/cm³. Daher hat sich der Großteil der ungelösten Gummipartikel bei einer Dichte von ca. 1,0 g/cm³ zusammen mit den Gesteinskörnungen abgesetzt und ließ sich nicht se-

parieren. Der Versuch einer Trennung der ungelösten Gummipartikel von der Gesteinskörnung wurde dann mit Wasser und Filterpapier durchgeführt. Da hier ähnliche Dichtebedingungen vorliegen, konnte die Separation nur ungenau erfolgen. Somit stellt in diesem Versuch für die Gummixtraktion die geringe Dichte des KME eine Problematik dar. Daneben ist durch die Handextraktion keine vollständige Aufteilung bzw. keine vollständige Reinigung in die einzelnen Kornklassen möglich gewesen.

Die Bilder 8 bis 11 zeigen diese Problematik fotografisch auf.



Bild 8: Feine extrahierte Gesteinskörnung mit Gummipartikeln



Bild 9: Mit Wasser getrennte Gummipartikel von den Gesteinskörnungen



Bild 10: Abgesiebte Kornklasse 5/8 mm

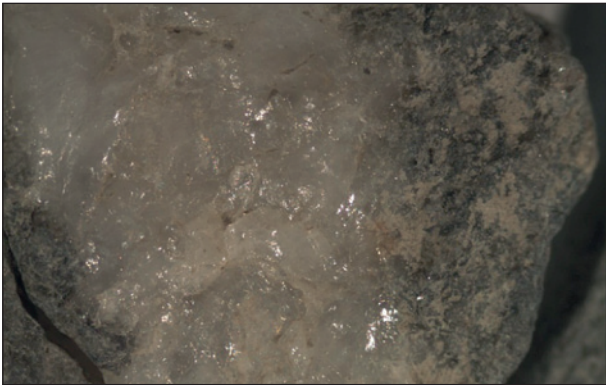


Bild 11: Mikroskopaufnahme eines Gesteinskorns mit Sandrückständen

Veraschung

Um einen hinreichend genauen Bindemittelgehalt von gummimodifizierten Asphalten unabhängig von der herkömmlichen Extraktion mit dem Lösemittel Trichlorethylen und den damit verbundenen einzuhaltenden Arbeitssicherheitsbestimmungen ermitteln zu können, wurde in einem separaten Schritt die Methode der Veraschung herangezogen. Bei der Veraschung wird das Material durch thermische Beanspruchung mithilfe eines Muffelofens (siehe Bild 12) verbrannt.

Das grundsätzliche Ziel der Veraschung ist es, bei der Kontrollprüfung das gummimodifizierte Asphaltmischgut zu veraschen und den verbleibenden Anteil zu bestimmen (Differenzverfahren).

Die genaue Herangehensweise und die gleichzeitige Bewertung der Erkenntnisse aus der Veraschung werden in Kapitel 5.2.3 und Kapitel 5.3.2 beschrieben.

4.3 Baumaßnahmen

Neben den Extraktionen an den im Labor hergestellten Asphalten SMA 8 S und PA 8 entsprechend den Untersuchungsvarianten nach Bild 4, wurden sechs verschiedene Baumaßnahmen – bei denen unterschiedliche gummimodifizierte Asphalte eingebaut wurden – begleitet und entnommenes Mischgut untersucht. Bei den Baumaßnahmen wurde das Trockenverfahren als Modifizierungsverfahren eingesetzt. Die Entnahme des Mischgutes erfolgte jeweils direkt nach dem Mischen und einer anschließenden erforderlichen Heißsilierungszeit an der Mischanlage.



Bild 12: Muffelofen zur Veraschung

Das Mischgut wurde zur Bestimmung des Bindemittelanteils und des ungelösten Gummipartikelanteils extrahiert. Dabei wurde der ungelöste Gummipartikelanteil wie unter Kapitel 4.2 beschrieben bestimmt.

Als abschließende Baumaßnahme wurde eine Strecke innerorts gewählt, bei der sowohl die Asphaltbinderschicht als auch die Asphaltdeckschicht unter Verwendung von gummimodifizierten Bindemittel erneuert wurde.

Die Baumaßnahme teilte sich auf in die unterschiedlichen Modifizierungsverfahren, wobei die Asphaltbinderschicht im Trockenverfahren und die Asphaltdeckschicht im Nassverfahren modifiziert wurden. Die Mischgutentnahme erfolgte jeweils direkt nach dem Mischen und einer anschließenden erforderlichen Heißsilierungszeit an der Mischanlage, sowie zu Beginn und in der Mitte des Einbaues.

Das Mischgut wurde ebenfalls zur Bestimmung des Bindemittelanteils und des ungelösten Gummipartikelanteils extrahiert. Dabei wurde der ungelöste Gummipartikelanteil wie unter Kapitel 4.2 beschrieben ermittelt.

Weiterhin wurden die in Tabelle 8 aufgeführten Kenndaten an dem Asphaltmischgut, an dem extrahierten Bindemittel und an dem Gesteinskörnungsgemisch ermittelt.

Kenndaten	Vorschrift/Norm
Asphaltrohddichte	[TP Asphalt-StB, Teil 5, 2007]
Raumdichte	[TP Asphalt-StB, Teil 6, 2007]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	[DIN EN 1427, 2007]
Nadelpenetration	[DIN EN 1426, 2007]
Korngrößenverteilung	[TP Asphalt-StB, Teil 2, 2007]

Tab. 8: Ermittelte Kenndaten am entnommenen Mischgut

5 Untersuchungsergebnisse und -bewertung

5.1 Analyse von ausgeführten Baumaßnahmen mit gummimodifizierten Asphalten

Für erste Vergleiche wurden folgende Erst- und Kontrollprüfungen bzw. Eigenüberwachungen von Baumaßnahmen mit gummimodifizierten offenen Asphalten PA 8, Splittmastixasphalten SMA 11 S und Asphaltbinder AC 16 B S betrachtet (siehe Tabellen 9 bis Tabelle 11). Der Bindemittelgehalt wurde nach Angaben der Baubeteiligten jeweils nach den [E GmBA, 2012] ermittelt. Diese Baumaßnahmen deckten die Modifizierungsmethoden Trockenverfahren und Nassverfahren ab. Eingesetzt wurden Gummimehle bzw. gummimodifiziertes Bitumen von unterschiedlichen Herstellern.

Anhand der geringen Abweichung zwischen den Werten des Bindemittelgehaltes der Erstprüfung zu Kontrollprüfung bzw. Eigenüberwachung lässt sich zunächst feststellen, dass eine hinreichend genaue Ermittlung des Bindemittelgehaltes offensichtlich möglich ist.

5.2 Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes

5.2.2 Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach den [E GmBA, 2012]

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurden insgesamt 69 Extraktionen an SMA 8 S und 16 Extraktionen an PA 8, die im Nassverfahren hergestellt wurden, durchgeführt und hinsichtlich des ungelösten Gummipartikelanteils ausgewertet. Bei diesen gummimodifizierten Asphalten wurde das Grund-

Baumaßnahme	Erstprüfung		Kontrollprüfung/ Eigenüberwachung			Abweichung [M.-%]
	Bindemittelgehalt [M.-%]		Bindemittelgehalt [M.-%]	Mittel		
1	6,0	32 Proben	5,98	-	-0,02	
			Min			5,7
			Max			6,3
2	5,8	16 Proben	6,12	+	+0,32	
			Min			5,4
			Max			6,8
3	6,0	8 Proben	5,96	-	-0,04	
			Min			5,6
			Max			6,4
4	6,6	4 Proben	6,60	-	-0,00	
			Min			6,4
			Max			6,8

Tab. 9: Erst- und Kontrollprüfung an PA 8

Baumaßnahme	Erstprüfung		Kontrollprüfung/ Eigenüberwachung			Abweichung [M.-%]
	Bindemittelgehalt [M.-%]		Bindemittelgehalt [M.-%]	Mittel		
1	6,3	6 Proben	6,50	+	+0,20	
			Min			6,3
			Max			6,6

Tab. 10: Erst- und Kontrollprüfung an SMA 11 S

Baumaßnahme	Erstprüfung		Kontrollprüfung/ Eigenüberwachung			Abweichung [M.-%]
	Bindemittelgehalt [M.-%]		Bindemittelgehalt [M.-%]	Mittel		
1	4,4	5 Proben	4,70	+	+0,30	
			Min			4,4
			Max			4,8

Tab. 11: Erst- und Kontrollprüfung an AC 16 B S

bitumen 50/70 und 70/100 mit Gummimehlanteilen von 10 M.-%, 20 M.-% und 30 M.-% verwendet. Die Mischtemperaturen bei der Herstellung der gummi-modifizierten Bindemittel variierten mit 160 °C und 180 °C, die Mischzeiten lagen bei 1 Stunde bzw. 2 Stunden und die Heißlagerungszeiten wurden mit 30 Minuten, 120 Minuten, 24 Stunden und 48 Stunden festgelegt. Die Mischtemperatur bei der Asphaltherstellung betragen 150 °C bzw. 170 °C und die Lagerungszeiten variierten mit 1 Stunde und 3 Stunden. Zusätzlich wurde ein gebrauchsfertiges gummi-modifiziertes Bindemittel herangezogen.

Im Weiteren wurden 24 Variationen SMA 8 S und acht Variationen an PA 8, die im Trockenverfahren hergestellt wurden, extrahiert und wiederum hinsichtlich des ungelösten Gummipartikelanteils analysiert. Die Mischtemperaturen bei der Asphaltherstellung betragen 150 °C, 170 °C und 190 °C. Die Lagerungszeiten variierten zwischen 1 Stunde und 3 Stunden.

Die Extraktionen wurden dahingehend ausgewertet, dass der Bindemittelgehalt ohne Gummipartikelanteil, der Bindemittelgehalt mit Gummipartikelanteil und der ungelöste Gummipartikelanteil ermittelt wurden. Zusätzlich wurde der ungelöste Gummipartikelanteil, d. h. der getrocknete wieder-gefundene Gummipartikelanteil, bezogen auf die jeweilige Zugabemenge des Gummimehles im Bitumen (10 M.-%, 20 M.-% bzw. 30 M.-%) berechnet.

Der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] – z. B. 15,0 M.-% – ist der Anteil, der sich nicht von dem zugegebenen Gummimehlanteil in [M.-%] – z. B. 20,0 M.-% – gelöst hat. Um diesen Wert unabhängig von den unterschiedlichen Zugabemengen darzustellen, wurde der ungelöste Gummipartikelanteil im weiteren Schritt normiert und in [%] angegeben – z. B. 75,0 % der Gummipartikel haben sich nicht im Bitumen gelöst.

Die jeweiligen Variationen mit den genauen Herstellungsbedingungen und die zugehörige Auswertung sind tabellarisch im Anhang festgehalten.

Zur näheren Analyse der ermittelten Ergebnisse wurde zunächst der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Mischzeiten, Heißlagerungszeiten und Mischtemperaturen sowohl bei der Herstellung des gummi-modifizierten Bitumens als auch des Asphalttes durch die Methode der multiplen linearen Regression betrachtet. Bei der multiplen linearen

Regression wird versucht, eine abhängige Variable durch mehrere unabhängige Variablen zu erklären.

Zur Vereinfachung werden zu Beginn folgende Abkürzungen festgelegt:

NP	Nadelpenetration	[0,1 mm]
GG	Gummimehlanteil	[M.-%]
MTB	Mischtemperatur Bitumen	[°C]
MZB	Mischzeit Bitumen	[h]
LZB	Lagerungszeit Bitumen	[Min]
MTA	Mischtemperatur Asphalt	[°C]
LZA	Lagerungszeit Asphalt	[h]
ungG	ungelöster Gummipartikelanteil	[M.-%]

Um eventuelle Zusammenhänge festzustellen, wurde die multiple lineare Regression getrennt für die Herstellungsverfahren der gummi-modifizierten Asphaltte, Trocken- und Nassverfahren, durchgeführt.

In Bild 13 sind alle ermittelten ungelösten Gummipartikelanteile in [M.-%] der im Trockenverfahren hergestellten Asphaltte SMA 8 S und PA 8 gegenüber den mittels Regression berechneten ungelösten Gummipartikelanteilen in [M.-%] dargestellt. Die Annäherungsformel in Abhängigkeit von der Bitumenhärte, des zugegebenen Gummimehlanteiles und den Herstellungseinflüssen aus Mischtemperatur und Lagerungszeit ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \text{ungGG}_{T, \text{berechnet}} &= -0,0550 \cdot \text{NP} + 0,7420 \cdot \text{GG} \\ &\quad - 0,0069 \text{ MTA} - 0,8776 \text{ LZA} \\ &\quad + 6,5200 \end{aligned}$$

Anhand dieser Formel lässt sich eine Tendenz dahingehend erkennen, dass der ungelöste Gummi-

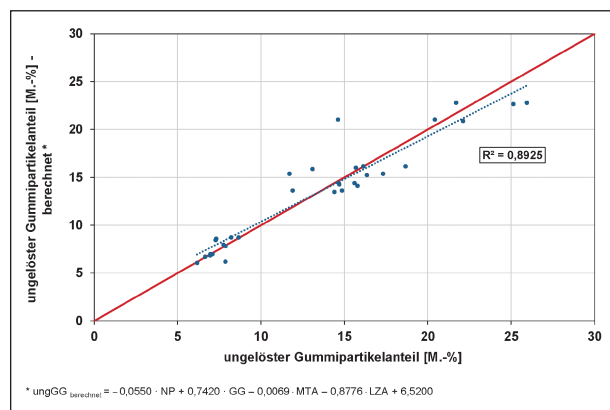


Bild 13: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Trockenverfahren komplett

partikelanteil in [M.-%] sowohl mit weicherem Bindemittel (NP) als auch mit steigender Mischtemperatur (MTA) und Lagerungszeit des Asphaltes (LZA) sinkt, im Umkehrschluss sich vermutlich mehr Gummimehl im Bitumen löst.

In Bild 14 bis Bild 16 sind alle ermittelten ungelösten Gummipartikelanteile in [M.-%] der im Nassverfahren hergestellten Asphalte SMA 8 S und PA 8 gegenüber den mittels Regression berechneten ungelösten Gummipartikelanteile in [M.-%] dargestellt. Die ermittelte Formel in Abhängigkeit der Bitumenhärte, des zugegebenen Gummimehlanteiles und den Herstellungseinflüssen aus Mischtemperatur, Misch- und Lagerungszeit ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \text{ungG}_{N1, \text{berechnet}} &= 0,0695 \cdot \text{NP} + 0,6975 \cdot \text{GG} \\ &+ 0,0154 \text{ MTB} + 1,9213 \text{ MZB} \\ &- 0,0003 \text{ LZB} - 0,000064 \text{ MTA} \\ &- 0,4527 \text{ LZA} - 8,0929 \end{aligned}$$

Die Tendenz, die durch das Trockenverfahren ermittelt wurde, lässt sich in diesem Fall nicht bestätigen. Anhand der Formel lässt sich feststellen, dass der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] sowohl mit weicherem Bindemittel (NP) als auch mit höherer Mischtemperatur (MTB) und Mischzeit (MZB) des Bitumens steigt, wiederum mit steigender Mischtemperatur (MTA) und Lagerungszeit (LZA) des Asphaltes sinkt. Die Lagerungszeit (LZB) des Bitumens geht mit einem minimalen Anteil in die Berechnung ein.

Im Gegensatz zu Bild 14 gehen in die nachfolgende Berechnung, dargestellt in Bild 15, nur die Einflüsse durch die Herstellung des gummimodifizierten Bitumens mit ein:

$$\begin{aligned} \text{ungG}_{N1, \text{berechnet}} &= 0,0777 \cdot \text{NP} + 0,7023 \cdot \text{GG} \\ &+ 0,0164 \cdot \text{MTB} + 2,1119 \cdot \text{MZB} \\ &- 0,0002 \cdot \text{LZB} - 9,9209 \end{aligned}$$

Der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] steigt mit zunehmender Mischtemperatur (MTB) und Mischzeit (MZB) des Bitumens.

Bild 16 stellt die Einflüsse bei der Herstellung des gummimodifizierten Asphaltes auf den ungelösten Gummipartikelanteil dar, während die Einflüsse bei der Herstellung des gummimodifizierten Bitumens in dieser Berechnung vernachlässigt werden:

$$\begin{aligned} \text{ungG}_{N2, \text{berechnet}} &= 0,0312 \cdot \text{NP} + 0,7068 \cdot \text{GG} \\ &+ 0,0011 \text{ MTA} - 0,5998 \text{ LZA} \\ &- 0,2986 \end{aligned}$$

Die Tendenz, die durch das Trockenverfahren ermittelt wurde, kann insofern bestätigt werden, dass der

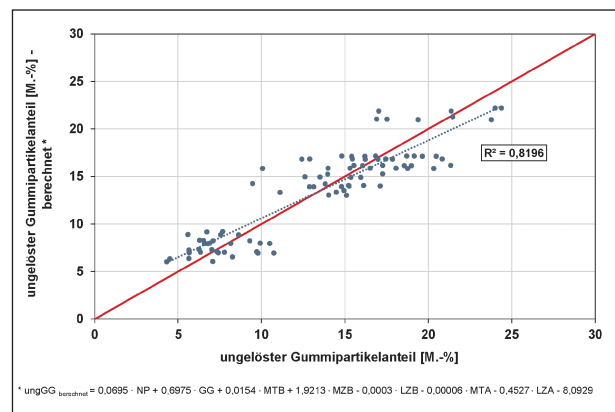


Bild 14: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren komplett

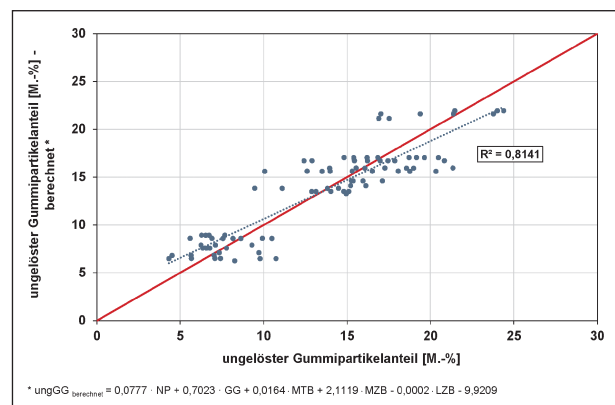


Bild 15: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren, Herstellungsbedingungen des gummimodifizierten Bitumens

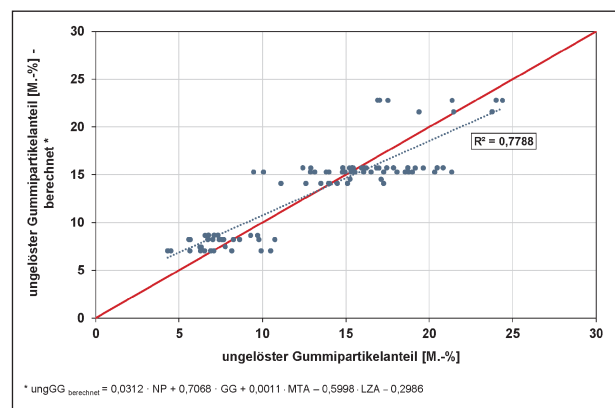


Bild 16: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren, Herstellungsbedingungen des gummimodifizierten Asphaltes

ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] mit steigender Lagerungszeit (LZA) der Asphaltes sinkt, im Umkehrschluss sich anscheinend mehr Gummipartikel im Bitumen lösen. Die Mischtemperatur (MTA) des Asphaltes geht mit einem minimalen Anteil in die Berechnung ein.

Generell lassen sich durch die Berechnungen Zusammenhänge mit brauchbaren Bestimmtheitsmaßen von 0,8 bis 0,9 abbilden.

Weiterhin können anhand dieser dargestellten Abhängigkeiten die Bereiche der Zugabeanteile an Gummimehl entnommen werden. So ist eine klare zu erwartende Tendenz dahingehend zu erkennen, dass der Anteil an ungelösten Gummipartikeln in [M.-%] mit steigendem Gummimehlanteil von 10 M.-% über 20 M.-% bis 30 M.-% zunimmt.

Jedoch treten innerhalb der erkennbaren Bereiche deutliche Schwankungen auf. Dies ist noch einmal durch die Winkelhalbierende, in den Diagrammen jeweils in Rot dargestellt, als Solllinie verdeutlicht.

Somit scheinen die Herstellungsbedingungen sowohl für das Nassverfahren als auch das Trockenverfahren in diesem Maße keinen Einfluss auf die Ermittlung der ungelösten Gummipartikel zu haben.

Um zu zeigen, dass die gewählten Grundbitumensorten 50/70 und 70/100 keinen Einfluss auf die Wirkung des Gummimehles in der Bitumenmatrix haben, wurde eine chemische Analyse und eine Siedeanalyse durchgeführt. In Tabelle 12 ist die chemische Zusammensetzung der verwendeten Straßenbaubitumen aufgeführt. Zu entnehmen sind die Spannweiten, in denen der jeweilige Bestandteil des Bitumens liegt. Es ist zu erkennen, dass beide Bitumen in ihrer chemischen Zusammensetzung vergleichbar sind und dies somit auch eine Erklärung

Bitumenprobe	50/70	70/100
Anteil Paraffin	0,3 – 0,8	0,3 – 1,4
Anteil Aliphaten	6,3 – 16,6	9,0 – 13,3
Anteil Monoaromaten	8,5 – 13,6	12,9 – 17,5
Anteil Diaromaten	5,7 – 12,2	10,7 – 12,3
Anteil Polyaromaten	9,3 – 22,3	13,5 – 20,7
Summe der Aromaten	23,5 – 48,1	37,4 – 46,8
Anteil polare Verbindungen	22,6 – 50,0	22,8 – 34,0
Anteil Asphaltene	18,9 – 20,2	15,1 – 19,1

Tab. 12: Ergebnisse der chemischen Analyse der Bitumensorten 50/70 und 70/100 – Spannweiten

liefert, dass die verwendeten Bitumensorten die Wirkung des Gummimehles im Hinblick auf den ungelösten Gummipartikelanteil nicht beeinflusst.

Bild 17 zeigt die Siedeverläufe der Bitumen 50/70 und 70/100. Der Destillationsanteil steigt quasi analog mit zunehmender Zeit und Temperatur auf 100 M.-%.

Zur weiteren Analyse der ermittelten Ergebnisse wurde der ungelöste Gummipartikelanteil in [%], unabhängig von der Zugabemenge des Gummimehles, betrachtet. Diese Werte werden in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Heißlagerungszeiten und Mischtemperaturen sowohl bei der Herstellung des gummimodifizierten Bitumens als auch des Asphaltes als Mittelwerte zusammengefasst.

In Bild 18 bis Bild 21 sind die gemittelten ungelösten Gummipartikelanteile, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles, für die im Trockenverfahren hergestellten Asphalte SMA 8 S und PA 8 in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der

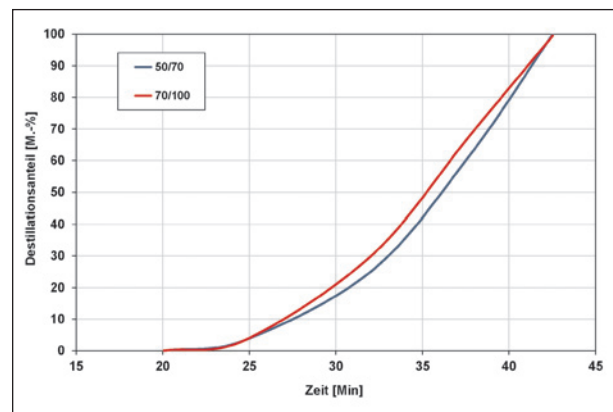


Bild 17: Siedeanalyse der Bitumensorten 50/70 und 70/100

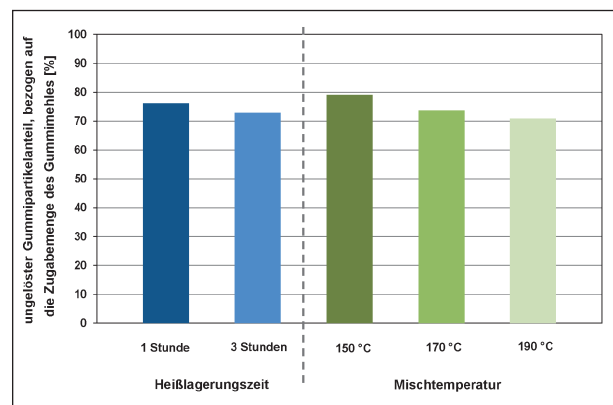


Bild 18: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)

Mischtemperatur aufgeführt. Die Darstellung erfolgt getrennt für die Grundbitumen 50/70 und 70/100.

Bei den Gemischen aus SMA 8 S ist unabhängig von dem Grundbitumen erkennbar, dass der unge-

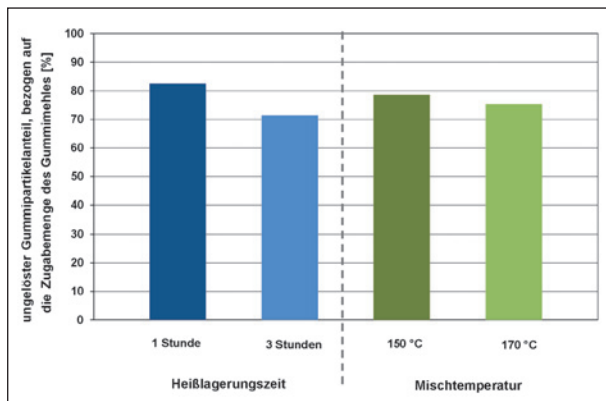


Bild 19: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)

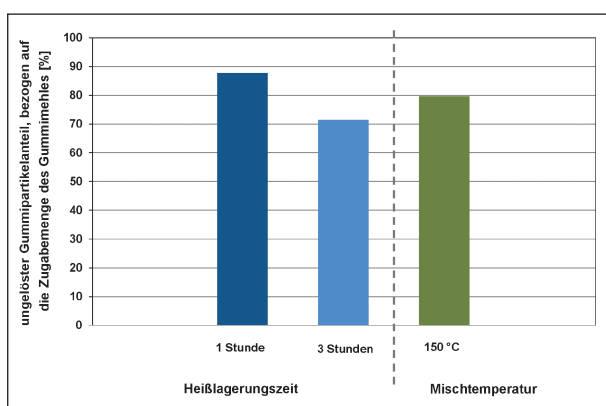


Bild 20: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)

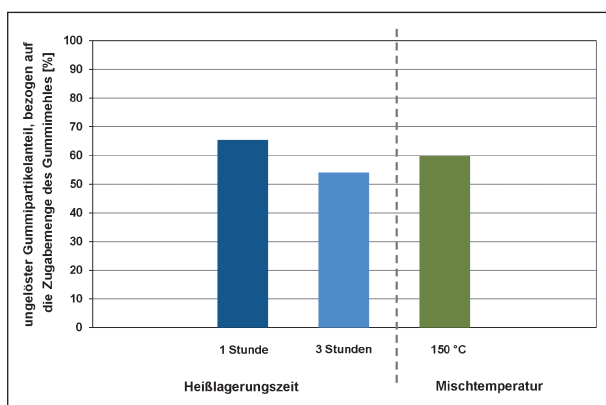


Bild 21: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)

löste Gummipartikelanteil mit Zunahme der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur abnimmt, d. h. umgekehrt, dass sich die Gummipartikel mit Zunahme der Zeit und der Temperatur mehr lösen. Diese zu erwartende Tendenz lässt sich für die Gemische aus PA 8 bestätigen. Jedoch sind wiederum Schwankungen in der Höhe des Gummipartikelanteils zu erkennen. So lassen sich unterschiedliche Anteile von ca. 50 % bis 90 % finden.

In Bild 22 bis Bild 25 sind die gemittelten ungelösten Gummipartikelanteile, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles, in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit sowohl für die im Nassverfahren hergestellten Gemische aus SMA 8 S als auch aus PA 8 getrennt von den verschiedenen Grundbitumen 50/70 und 70/100 dargestellt.

Die zu erwartende Tendenz, dass sich mit Zunahme der Heißlagerungszeit der Anteil der ungelösten

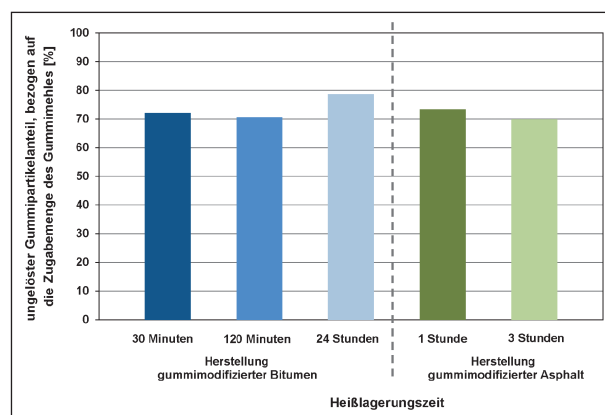


Bild 22: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)

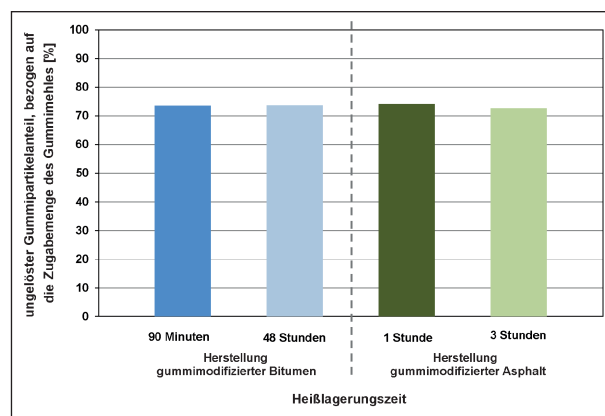


Bild 23: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)

Gummipartikel verringert, ist hier nicht eindeutig zu erkennen. Mit zunehmender Lagerungszeit des Asphaltes, nimmt der ungelöste Gummipartikelanteil ab. Jedoch schwankt mit Zunahme der Lagerungszeit des Bitumens der Anteil zwischen Zunahme und Abnahme.

In Bild 26 bis Bild 29 sind die gemittelten ungelösten Gummipartikelanteile, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles, in Abhängigkeit von der Mischtemperatur sowohl für die im Nassverfahren hergestellten Asphalte getrennt von den verschiedenen Grundbitumen 50/70 und 70/100 zu betrachten. In diesem Fall ergibt sich keine eindeutige Tendenz dahingehend, dass der ungelöste Gummipartikelanteil mit Zunahme der Mischtemperatur abnimmt oder zunimmt.

Die gemittelten ungelösten Gummipartikelanteile bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles

für das gebrauchsfertige gummimodifizierte Bindemittel sind in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur bei der Herstellung

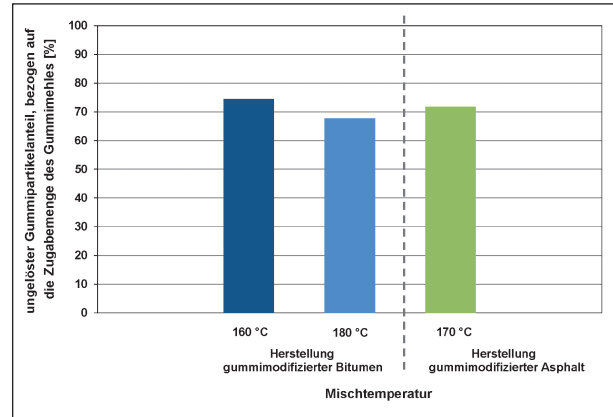


Bild 26: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)

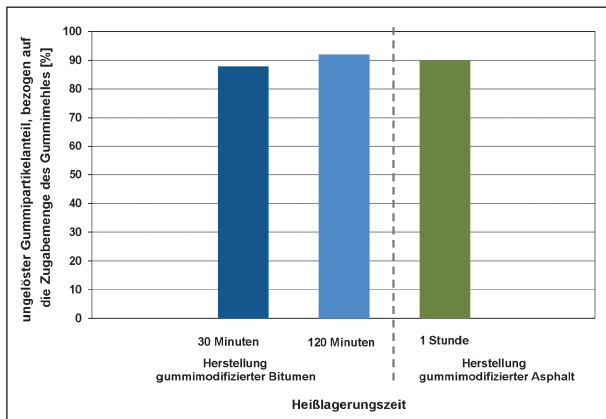


Bild 24: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)

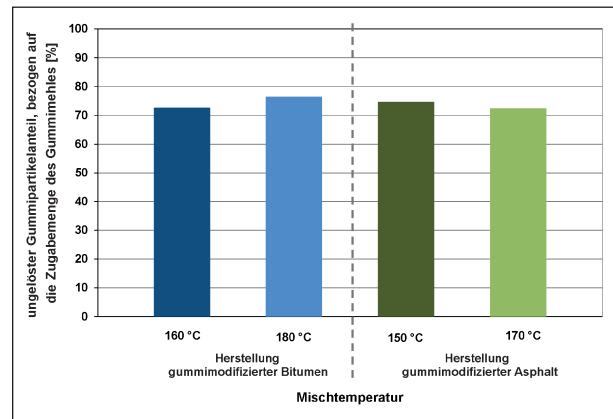


Bild 27: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)

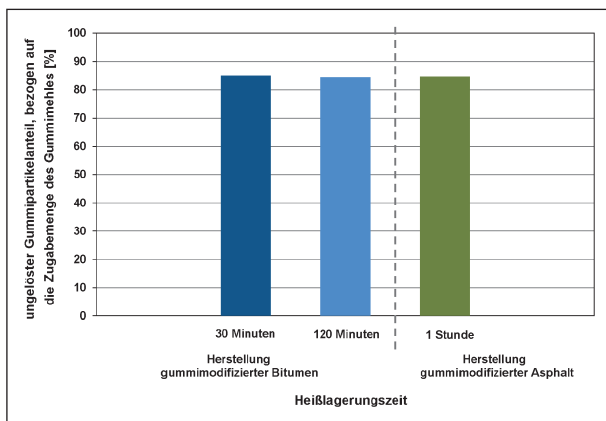


Bild 25: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)

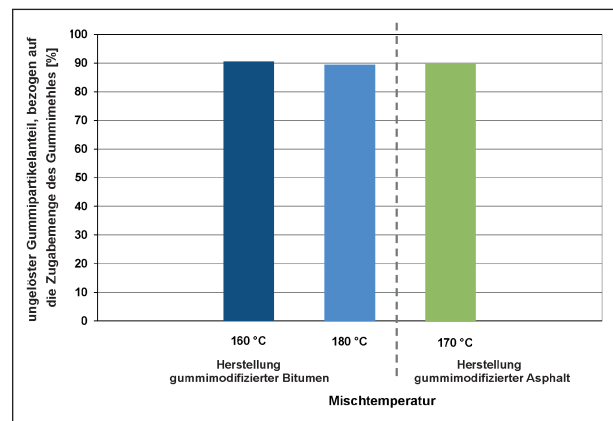


Bild 28: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)

des Asphaltes in Bild 30 und Bild 31 dargestellt. Es wird von einem Zugabeanteil von 15 M.-% Gummimehl bezogen auf das Bindemittel ausgegangen.

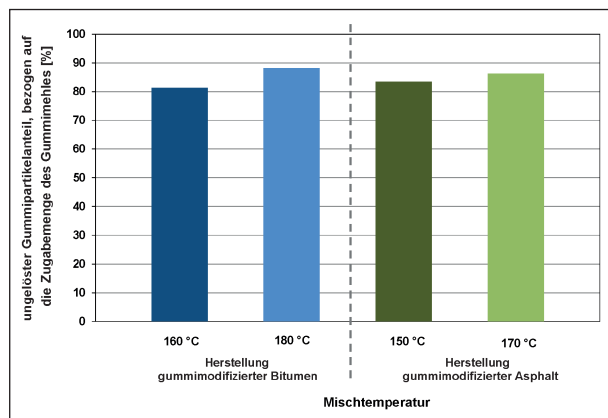


Bild 29: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)

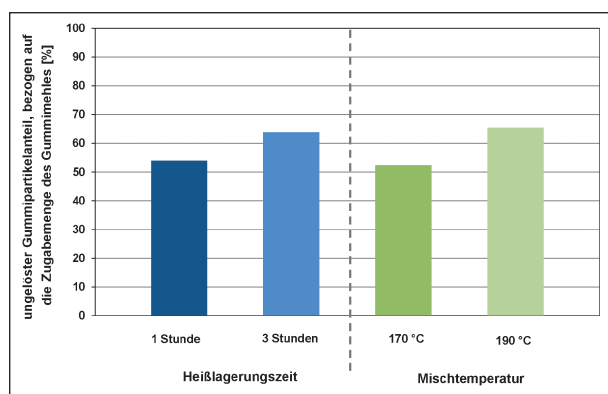


Bild 30: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit gebrauchsfertigem gummodifizierten Bindemittel)

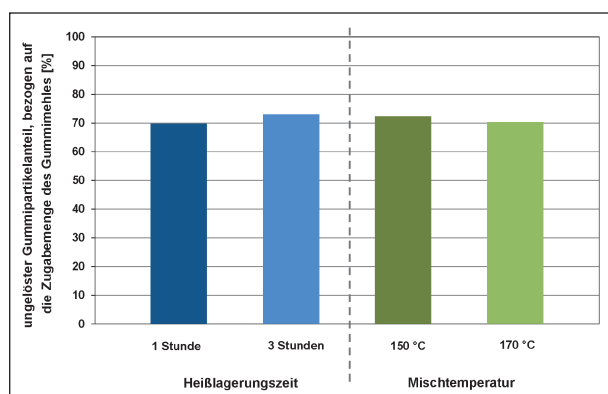


Bild 31: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit gebrauchsfertigem gummodifizierten Bindemittel)

Auffällig ist, neben der wiederum auftretenden Schwankungen, dass im Mittel verhältnismäßig geringe ungelöste Gummipartikelanteile auftreten. Allerdings stellen die Werte aufgrund der Untersuchungsvarianz jeweils Mittelwerte von nur zwei Proben dar.

Grundsätzlich lässt sich anhand dieser Auswertung festhalten, dass die Herstellungsbedingungen keine eindeutigen Auswirkungen auf den extrahierbaren Bindemittelgehalt von Asphalten mit gummodifizierten Bitumen bzw. auf die Bestimmung des ungelösten Gummipartikelanteils haben.

Weiterhin wurden, um die Schwankungen bei der Ermittlung des ungelösten Gummipartikelanteils und somit des Bindemittelgehaltes aufzuzeigen, die Mittelwerte und die Spannweiten für den ungelösten Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in [%] und den Bindemittelgehalt ohne und mit Gummipartikelanteil in [M.-%] erfasst. Dabei wurden neben den Werten der gesamten Untersuchungsvarianten, die Werte getrennt nach den Modifizierungsverfahren, Trocken- und Nassverfahren und den hergestellten Asphalten, SMA 8 S und PA 8 betrachtet.

Bei dem SMA 8 S wurde nach der Asphaltrezeptur ein Bindemittelgehalt von 7,0 M.-% und bei dem PA 8 ein Bindemittelgehalt von 6,5 M.-% eingesetzt. Diese Bindemittelgehalte verstehen sich einschließlich des Gummimehlanteils von entweder 10 M.-%, 20 M.-% oder 30 M.-%. So hat z. B. ein SMA 8 S mit dem Bindemittel 70/100 und 30 M.-% Gummimehl bezogen auf das Asphaltmischgut einen Anteil 70/100 von 4,9 M.-% und einen Gummimehlanteil von 2,1 M.-%. Eine Übersicht über die verschiedenen Bindemittel- und Gummimehlanteile liefern die Tabelle 4 (SMA 8 S) und Tabelle 5 (PA 8).

Tabelle 13 gibt die ungelösten Gummipartikelanteile und Bindemittelgehalte, erfasst ohne Gummi- und mit Gummipartikel, für die im Trockenverfahren hergestellten SMA 8 S wieder. Die große Abweichung in den Werten für den Bindemittelgehalt ohne Gummipartikel ergibt sich aus den vorher beschriebenen, in der Berechnung zu berücksichtigenden, zugegebenen Gummimehlanteilen im Asphalt.

Als Mittelwert kann für den ungelösten Gummipartikelanteil ein Wert von 75,7 % bestimmt werden. Ebenso kann im Mittel ein Bindemittelgehalt inklusive Gummipartikel von 7,1 M.-% ermittelt werden, welcher dem zugegebenen Wert von 7,0 M.-% ziemlich genau entspricht.

	Trockenverfahren SMA 8 S		
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]
Mittelwert	75,7	6,1	7,1
Maximum	86,6	6,8	7,5
Minimum	61,5	5,3	6,7

Tab. 13: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Trockenverfahren SMA 8 S

	Trockenverfahren PA 8		
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]
Mittelwert	69,7	5,7	6,6
Maximum	93,3	6,2	6,8
Minimum	48,7	5,2	6,4

Tab. 14: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Trockenverfahren PA 8

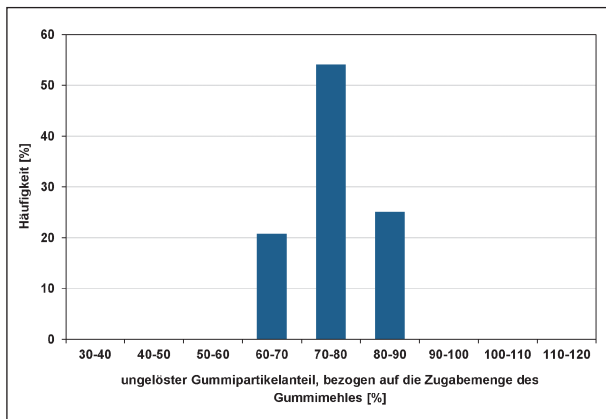


Bild 32: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Trockenverfahren SMA 8 S, N = 24

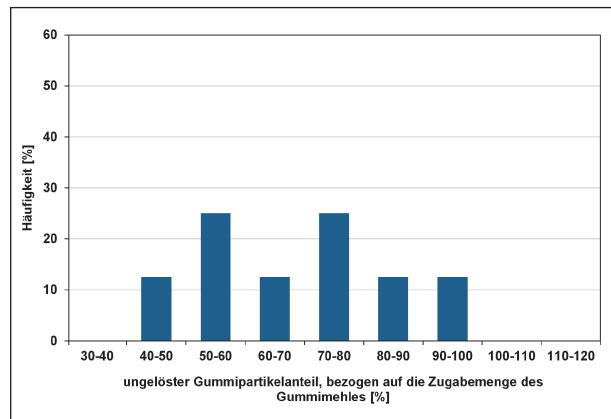


Bild 33: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Trockenverfahren PA 8, N = 8

Bild 32 zeigt die Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils von 24 SMA 8 S Extraktionen. Es ist eine Spannweite von 61,5 % bis 86,6 % zu erkennen und der Bereich von 70 % bis 80 % ungelöster Gummipartikel mit einem Anteil von ca. 55 % als Hauptbereich auszumachen.

Insgesamt wurden acht Extraktionen von im Trockenverfahren hergestellten PA 8 durchgeführt. Der Mittelwert des ungelösten Gummipartikelanteils liegt bei 69,7 % . Ein Bindemittelgehalt inklusive Gummipartikel kann im Mittel mit 6,6 M.-% den zugegeben Bindemittelgehalt von 6,5 M.-% erfüllen.

Bild 33 zeigt die Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils der acht PA 8 Extraktionen. Es ist die Spannweite von 48,7 % bis 93,3 % zu erkennen. Aufgrund der geringen Anzahl der Prüfungen fällt die Häufigkeitsverteilung ungewöhnlich gleichmäßig aus.

Tabelle 15 und Tabelle 16 geben die ungelösten Gummipartikelanteile und die Bindemittelgehalte, erfasst ohne Gummi- und mit Gummipartikel, für die im Nassverfahren hergestellten SMA 8 S und PA 8 wieder. Die großen Abweichungen in den Werten für den Bindemittelgehalt ohne Gummipartikel ergeben sich wiederum aus den vorher beschriebenen, in der Berechnung zu berücksichtigenden, zugegebenen Gummimehlanteilen im Asphalt.

Im Mittel entsprechen die Bindemittelgehalte mit Gummipartikel den jeweils zugegebenen Gehalten. Die Mittelwerte der ungelösten Gummipartikel liegen bei 71,7 % (SMA 8 S) und 82,7 % (PA 8). Bild 34 und Bild 35 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der ungelösten Gummipartikelanteile der 69 extrahierten Gemische aus SMA 8 S und der 32 extrahierten Gemische aus PA 8 im Nassverfahren.

Zu erkennen sind große Spannweiten, die im Maximum ungelöste Gummipartikelanteile von über

	Nassverfahren SMA 8 S		
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]
Mittelwert	71,7	6,3	7,1
Maximum	107,4	7,1	7,7
Minimum	43,1	5,5	6,3

Tab. 15: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nassverfahren SMA 8 S

	Nassverfahren PA 8		
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]
Mittelwert	82,7	5,4	6,5
Maximum	106,7	5,8	7,0
Minimum	60,4	5,0	6,1

Tab. 16: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nassverfahren PA 8

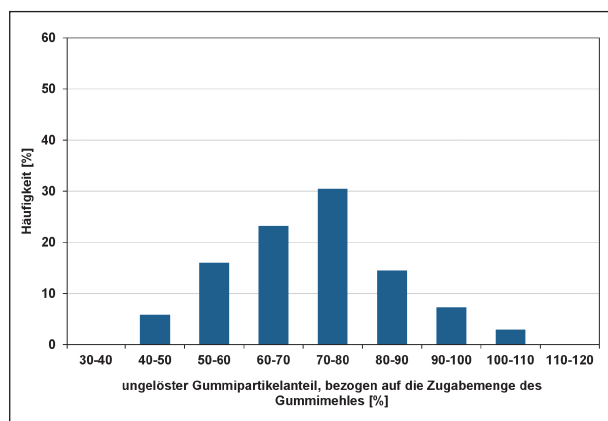


Bild 34: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nassverfahren SMA 8 S, N = 69

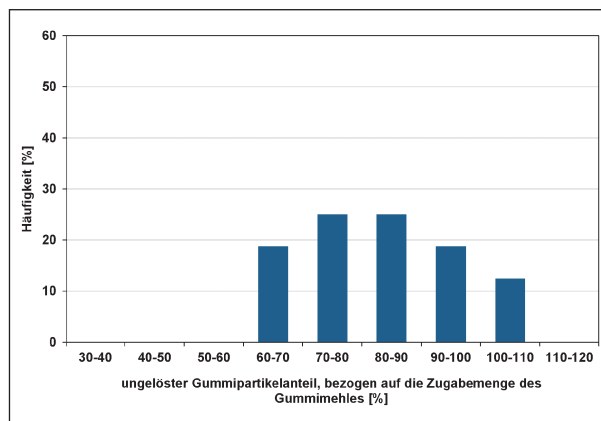


Bild 35: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nassverfahren PA 8, N = 32

100 % ausweisen. Dies weist daraufhin, dass sich in den ungelösten Gummipartikelanteilen Füllerteile befinden. Die zusätzlich durchgeführten Mikroskopaufnahmen (Bild 39) belegen diese Vermutung.

Im nächsten Schritt werden zusammenfassend die Modifizierungsverfahren Trocken- und Nassverfahren jeweils für die hergestellten Asphalte, SMA 8 S und PA 8 betrachtet. In den Tabellen 17 und 18 sind die Mittelwerte und die Spannweiten für die ungelösten Gummipartikel und die Bindemittelgehalte, erfasst ohne Gummi- und mit Gummipartikel, aufgeführt. Diese Werte bestätigen die oben beschriebenen Aussagen hinsichtlich des ermittelten Bindemittelgehaltes mit Gummipartikeln.

Die Bilder 36 und 37 zeigen grafisch, wie häufig welche Gummipartikelanteile von 93 Extraktionen an SMA 8 S und 40 Extraktionen an PA 8 auftreten. Die Mittelwerte der ungelösten Gummipartikel lie-

gen bei 72,7 % (SMA 8 S) und 80,1 % (PA 8). Jedoch lassen sich auch hier große Spannweiten ausmachen. So ergeben sich im Maximum ungelöste Gummipartikelanteile von über 100 % und im Minimum von unter 50 %. Dies weist einerseits daraufhin, dass sich in den ungelösten Gummipartikelanteilen Füllerteile befinden, andererseits aber auch Gummipartikel in den Gesteinskörnungen. Bild 39 und Bild 40 zeigen Mikroskopaufnahmen, die dies belegen.

Um eine Verteilung der ungelösten Gummipartikelanteile aller 133 extrahierten Asphalte aufzuzeigen, sind in Tabelle 19 der Mittelwert und die zugehörigen Spannweiten dargelegt. Der Mittelwert der ungelösten Gummipartikel liegt bei 75,0 %, d. h. dass anhand der Vielzahl der Ergebnisse zunächst grob als mittlere Tendenz festgehalten werden kann, dass sich 25,0 % der Gummipartikel im Bitumen lösen.

	Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S		
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]
Mittelwert	72,7	6,2	7,1
Maximum	107,4	7,1	7,7
Minimum	43,1	5,3	6,3

Tab. 17: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S

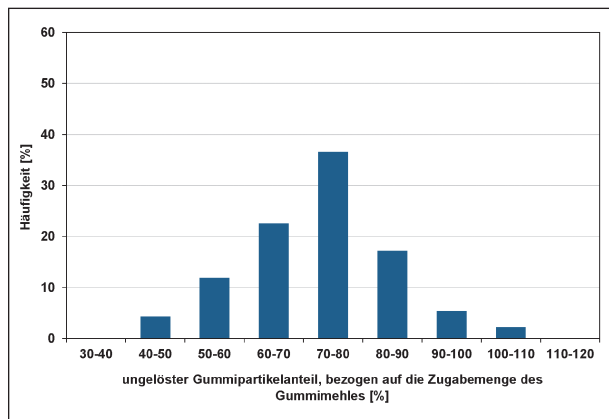


Bild 36: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S, N = 93

	Nass- und Trockenverfahren PA 8		
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]
Mittelwert	80,1	5,5	6,5
Maximum	106,7	6,2	7,0
Minimum	48,7	5,0	6,1

Tab. 18: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nass- und Trockenverfahren PA 8

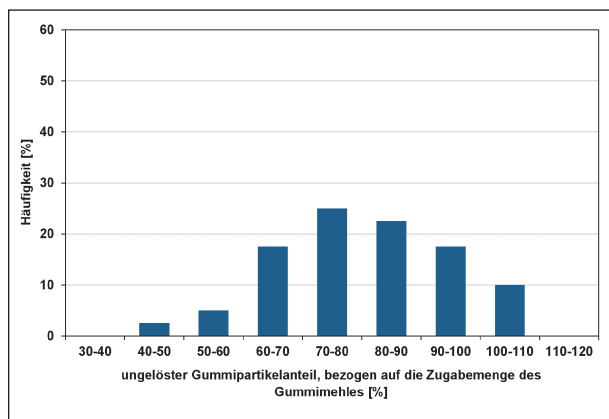


Bild 37: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren PA 8, N = 40

	Nass- und Trockenverfahren PA 8 und SMA 8 S	
	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]	
Mittelwert	75,0	
Maximum	107,4	
Minimum	43,1	

Tab. 19: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S und PA 8

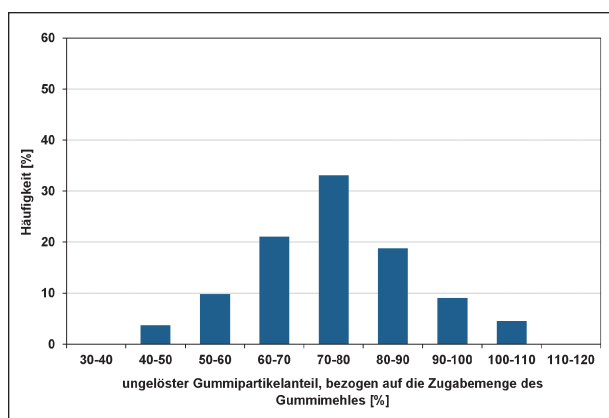


Bild 38: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S und PA 8, N = 133

Bild 38 gibt einen Überblick über die Häufigkeiten der ungelösten Gummipartikel. Wie durch die vorherigen Bewertungen zu erwarten, gibt es eine große Spannweite, die sich von 43,1 % bis 107 % erstreckt. Dabei lässt sich der Bereich von 70 % bis 80 % als Bereich der größten Häufigkeit ausmachen, welches auch die jeweiligen Mittelwerte der ungelösten Gummipartikelanteile, die bei der separaten Betrachtung nach den Modifizierungsverfahren,

Trocken- und Nassverfahren und den hergestellten Asphalten, SMA 8 S und PA 8, ermittelt wurden, widerspiegeln.

Mikroskopie

Zusätzlich zur Auswertung des Bindemittelgehaltes unter Berücksichtigung des ungelösten Gummipartikelanteils wurden die einzelnen extrahierten Bestandteile zur genaueren Analyse mikroskopisch festgehalten. Hiermit lassen sich die grundsätzlichen Schwierigkeiten der Extraktion von gummi-modifizierten Asphalten dokumentieren.

Es ist festzuhalten, dass sich auf der einen Seite Fülleranteile in den dekantierten ungelösten Gummipartikelanteilen (Bild 39) und sich auf der anderen Seite Gummipartikel im extrahierten Gesteinskörnungsgemisch (Bild 40) wiederfinden lassen. Mit dieser Erkenntnis lassen sich die Schwankungen hinsichtlich des ungelösten Gummipartikelanteils und des gesamten Bindemittelgehaltes erklären. Der ungelöste Gummipartikelanteil wurde teilweise mit über 100 % ermittelt, da die Fülleranteile diesen Wert verfälschen. Umgekehrt kann der Anteil auch sehr gering sein, da die ungelösten Gummipartikel im Gesteinskörnungsgemisch zurückblieben.

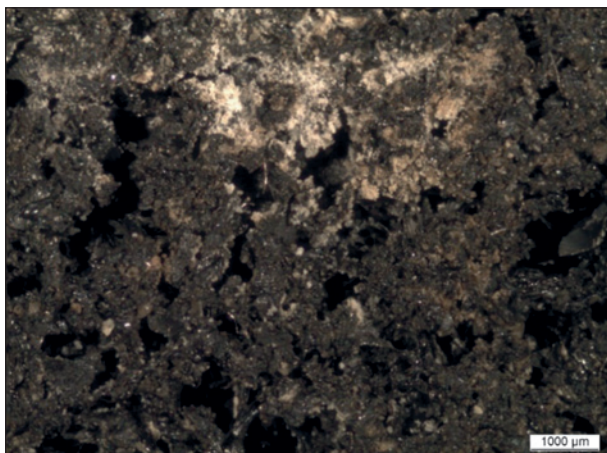


Bild 39: Fülleranteile in ungelösten Gummipartikeln



Bild 40: Gummipartikel in Gesteinskörnungen

Geschlossene Extraktionsanlagen

Ergänzend zu den eigenen Untersuchungen wurde Kontakt mit Herstellern von Extraktionsanlagen aufgenommen, die sich mit der Automatisierung der Extraktion von gummi-modifizierten Asphalt mit dem Lösemittel Trichlorethylen beschäftigen. In diesen Extraktionsanlagen wurden vergleichende Untersuchungen an gummi-modifizierten Asphalten (Nass- und Trockenverfahren) durchgeführt.

Bei der geschlossenen Extraktionsanlage des einen Herstellers wird das gummi-modifizierte Asphaltmischgut in einer separaten Auswascheinrichtung mit automatischer Dekantiereinrichtung extrahiert. Darin wird das Mischgut durch regelmäßiges Durchmischen und Spülen gelöst und die ungelösten Gummipartikel werden aufgeschwemmt und über eine Abschöpfereinrichtung mit einem Sieb 0,063 mm separiert (siehe Bild 41).

Bei der geschlossenen Extraktionsanlage des anderen Herstellers (Bild 42) wird ebenfalls mit einem separaten Bauteil zur Extraktion von gummi-modifizierten Asphalt gearbeitet. Dabei wird das Mischgut

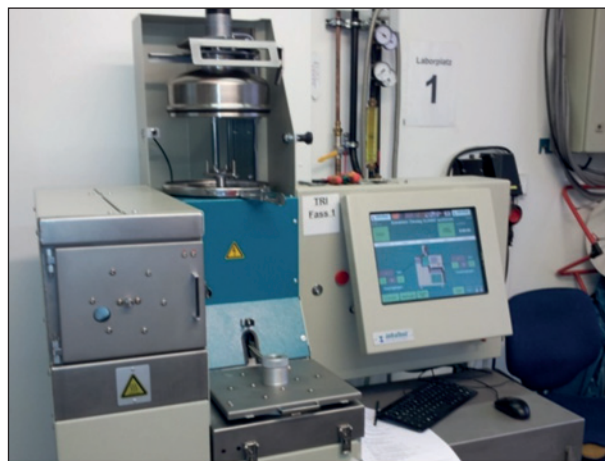


Bild 41: Geschlossene Extraktionsanlage – Hersteller 1



Bild 42: Geschlossene Extraktionsanlage – Hersteller 2

durch Mischen und Spülen gelöst. Eingesetzt werden Siebe 0,063 mm und 0,125 mm. Die Gesteinskörnungen und die ungelösten Gummipartikel verbleiben separiert im Waschkorb.

Die dargestellten Extraktionsanlagen befinden sich noch in der Weiterentwicklung, um die ungelösten Gummipartikel exakter abtrennen zu können, was bisher noch nicht gelang.

5.2.2 Untersuchungen am hergestellten gummimodifizierten Bitumen

Da aus den vorangegangenen Asphaltextraktionen keine eindeutig erkennbaren Abhängigkeiten bezüglich des ungelösten Gummipartikelanteiles und der Heißlagerungszeiten festzustellen waren, wurde eine zusätzliche Untersuchungsreihe zur Extraktion von reinem gummimodifizierten Bitumen durchgeführt. Um den grundsätzlichen Einfluss verschiedener Heißlagerungszeiten zu untersuchen, wurde ein Straßenbaubitumen 50/70 mit 20 M.-% Gummimehl gemischt und anschließend unter Variation der Heißlagerungszeiten von 30 Minuten bis 72 Stunden im Trockenschrank bei 180 °C dem Reifeprozess unterzogen.

Die Bezeichnung der hergestellten gummimodifizierten Bindemittel erfolgt dabei im Weiteren folgendermaßen: „Grundbitumen + Anteil und Abkürzung des verwendeten Zusatzes“. Die Bezeichnung 50/70+20GG bedeutet somit „Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 mit 20 M.-% Gummimehl“.

Gummimodifiziertes Bitumen

Die rheologischen Eigenschaften der gummimodifizierten Bitumen wurden wie zuvor beschrieben mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR) im Temperaturbereich zwischen -10 °C und 90 °C bestimmt. Zur Analyse der Veränderungen der charakteristischen Bindemittleigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur werden die Prüfergebnisse jeweils in Form des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels sowie mit dem Black-Diagramm abgebildet. Das Black-Diagramm stellt den Phasenwinkel gegen den komplexen Schermodul dar. Um den Einfluss der Modifizierung zu beurteilen, wird das der Modifizierung zugrundeliegende Grundbitumen 50/70 mit abgebildet.

Bild 43 zeigt den komplexen Schermodul über den gesamten geprüften Temperaturverlauf. Der komplexe Schermodul beschreibt die Steifigkeit des Bindemittels und steigt demnach mit der Viskosität des Bindemittels an.

Grundsätzlich ist eine deutliche Beeinflussung des komplexen Schermoduls durch die Gummimodifizierung zu erkennen. In Bezug auf das Grundbitumen wird die Steifigkeit im Temperaturbereich ab 10 °C bis 30 °C durch die Modifizierung erhöht. Mit Reduzierung der Temperatur auf -10 °C ist eine Abnahme der Steifigkeiten im Verhältnis zu dem Grundbitumen zu beobachten.

Um den Einfluss der Heißlagerungszeiten auf den komplexen Schermodul zu verdeutlichen, sind in Bild 44 der Tieftemperaturbereich von -10 °C bis 0 °C und in Bild 45 der Hochtemperaturbereich von 80 °C bis 90 °C abgebildet.

Für den Tieftemperaturbereich ist zu erkennen, dass mit Zunahme der Heißlagerungszeit bis zu 32 Stunden eine Abnahme der Steifigkeit stattfindet. Bei den Heißlagerungszeiten von 48 Stunden und 72 Stunden steigt die Steifigkeit wieder an.

Nach [ABDELRAHMAN, 2006] kommt es bei zu langer Reaktionszeit zu einer Depolymerisation, einer Zerstörung des Gummimehles, und die Wirkung des Gummimehles nimmt ab. Ebenfalls altert das

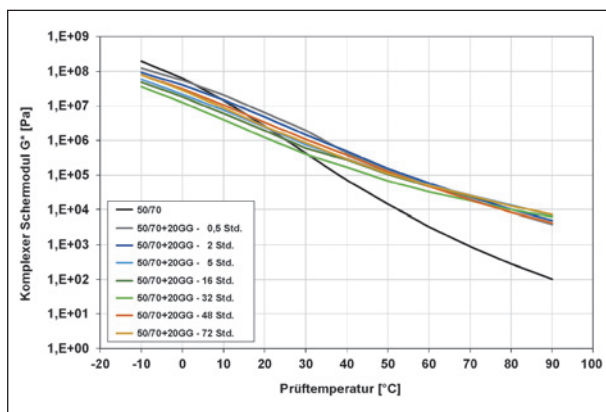


Bild 43: Komplexer Schermodul – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C

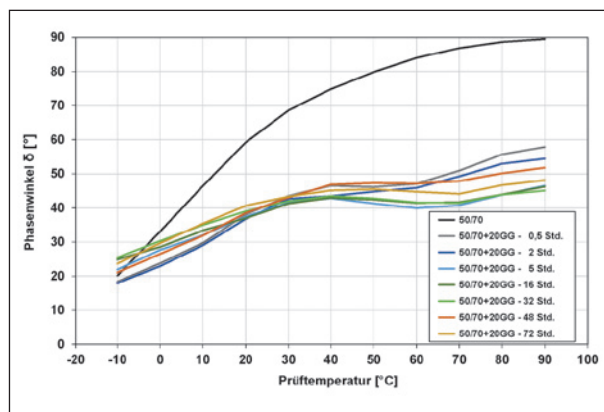


Bild 46: Phasenwinkel – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C

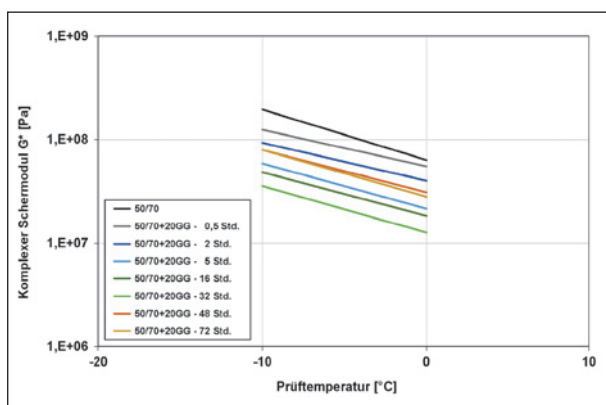


Bild 44: Komplexer Schermodul – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Tieftemperaturbereich -10 °C bis 0 °C

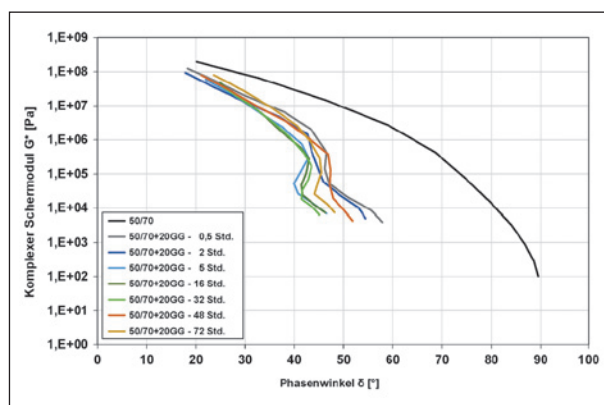


Bild 47: Black-Diagramm – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C

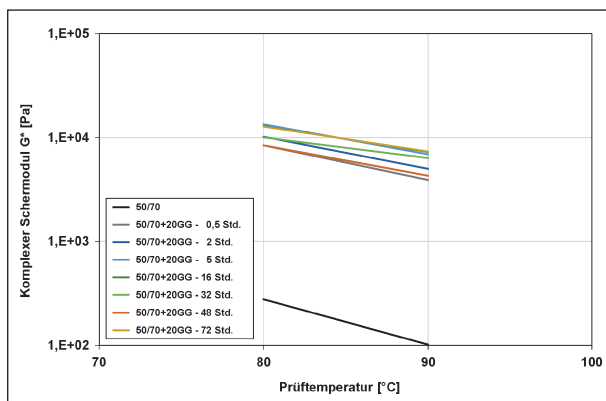


Bild 45: Komplexer Schermodul – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Hochtemperaturbereich von 80 °C bis 90 °C

Bitumen unter Einfluss von Temperatur und durch diese Verhärtung des Bindemittels steigt der komplexe Schermodul wieder an.

Im Hochtemperaturbereich rücken die Verläufe der Bindemittel mit Gummimodifizierung unabhängig von der Heißlagerungszeit näher zusammen und

der Abstand zwischen dem komplexen Schermodul des Grundbitumens und des modifizierten Bindemittels erhöht sich. Ebenfalls lässt sich keine eindeutige Reihenfolge mehr hinsichtlich der Lagerungszeiten feststellen.

Bild 46 zeigt den Verlauf des Phasenwinkels über den gesamten geprüften Temperaturverlauf. Analog zu dem komplexen Schermodul nehmen die elastischen Anteile, in Form eines verringerten Phasenwinkels, mit der Gummimodifizierung zu. Mit Reduzierung der Temperatur verkürzt sich der Abstand zwischen den Phasenwinkeln des Grundbitumens und der modifizierten Varianten.

Im Black-Diagramm (Bild 47) wird die Modifizierung durch die unterschiedlichen Kurvenverläufe deutlich. Mit der Modifizierung und mit ansteigender Temperatur wird die Krümmung der Verläufe ausgeprägter.

Die rheologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei allen Lagerungszeiten eine deutliche Erhö-

hung der elastischen Anteile zu Lasten der viskosen Anteile im Vergleich zum 50/70 zu verzeichnen ist. Ein Maximum der Elastifizierung ist bei einer Lagerungszeit von 32 Stunden auszumachen.

Ungelöster Gummipartikelanteil

Das gummimodifizierte Bitumen wurde mit Trichlorethylen extrahiert, indem das Bindemittel-Lösemittel-Gemisch über ein 0,09 mm Sieb dekantiert wurde und die ungelösten Gummipartikel erfasst wurden.

Der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] ist der Anteil, der sich nicht von dem zugegebenen Gummimehlanteil in [M.-%] gelöst hat. Z. B. haben sich bei einer Heißlagerungszeit von 16 Stunden 15,6 M.-% von den zugegebenen 20 M.-% nicht gelöst. Um diesen Wert unabhängig von den unterschiedlichen Zugabemengen zu machen, wurde der ungelöste Gummipartikelanteil im weiteren Schritt normiert und bezogen auf den Gesamtgummipartikelanteil betrachtet (z. B. 78,0 % Gummipartikel haben sich nicht im Bitumen gelöst).

In Tabelle 20 ist der ungelöste Gummipartikelanteil in Abhängigkeit von den Heißlagerungszeiten dargestellt. Nach 30 Minuten Heißlagerungszeit liegt der Anteil an ungelösten Gummipartikeln bei 90 %. Nach 72 Stunden dagegen nur noch bei 77 %. Dieser Anteil spiegelt den ermittelten Mittelwert an ungelösten Gummipartikeln von 75 % (vgl. Tabelle 19) bei den vorangegangenen Asphaltextraktionen wider.

Extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen

Zur Untersuchung, inwiefern sich die Heißlagerungszeiten und die eventuell gelösten Gummipartikel auswirken, wurden an dem extrahierten rückgewonnenen Bindemittel die Nadelpenetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt. Die Ergebnisse der Prüfungen von dem Straßenbaubitumen 50/70 ohne Gummimodifizierung sind in Tabelle 21 als Mittelwerte zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Prüfungen zur Nadelpenetration und zum Erweichungspunkt Ring und Kugel nach der Extraktion sind in Abhängigkeit von den Heißlagerungszeiten in Tabelle 22 als Mittelwerte aufgeführt. Die extrahierten gummimodifizierten Bitumen zeigen, in Bezug auf das eingesetzte Grundbitumen und unabhängig von der Heißlagerungszeit, durchgehend eine Verringerung der Nadelpen-

Heißlagerungszeit [h]	Ungelöster Gummipartikelanteil [M.-%]	Ungelöster Gummipartikelanteil [%]
0,5	18,1	90
2	17,0	85
5	17,4	87
16	15,6	78
32	16,4	82
48	14,8	74
72	15,4	77

Tab. 20: Ungelöster Gummipartikelanteil in Abhängigkeit von den Heißlagerungszeiten

Bitumensorte	Nadelpenetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
50/70	59,9	49,9

Tab. 21: Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70

Heißlagerungszeit [h]	Nadelpenetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
0,5	47,5	60,8
2	48,6	60,8
5	52,9	54,5
16	51,1	55,7
32	52,5	57,3
48	47,0	62,5
72	57,5	55,2

Tab. 22: Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel in Abhängigkeit von den Heißlagerungszeiten – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG

netration bei gleichzeitiger Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel.

Die rheologischen Eigenschaften der extrahierten gummimodifizierten Bitumen wurden mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR) im Temperaturbereich zwischen -10 °C und 150 °C bestimmt. Zur Analyse der Veränderungen der charakteristischen Bindemittelleigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur, werden die Prüfergebnisse jeweils in Form des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels sowie mit dem Black-Diagrammen abgebildet. Um den Einfluss der gelösten Gummipartikel zu beurteilen, wird das der Modifizierung zugrundeliegende Grundbitumen 50/70 mit abgebildet.

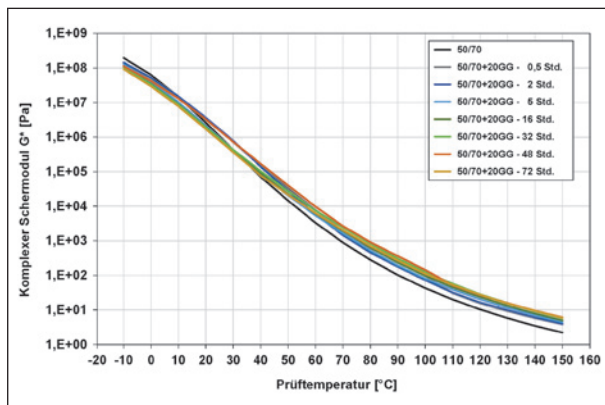


Bild 48: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummi-modifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C

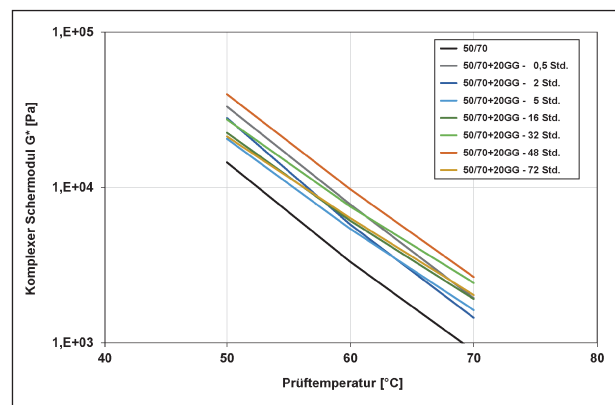


Bild 50: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummi-modifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Gebrauchstemperaturbereich 50 °C bis 70 °C

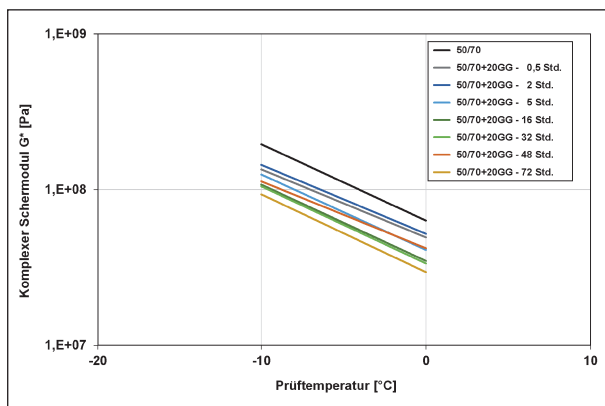


Bild 49: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummi-modifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Tieftemperaturbereich -10 °C bis 0 °C

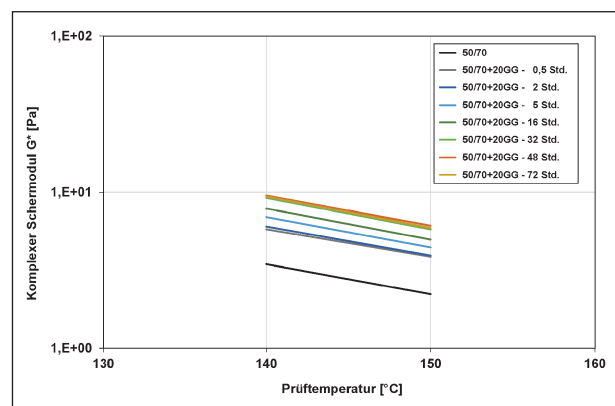


Bild 51: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummi-modifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Hochtemperaturbereich von 140 °C bis 150 °C

Bild 48 zeigt den komplexen Schermodul über den gesamten geprüften Temperaturverlauf. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass auch die geringe Menge gelöster Gummipartikel im Grundbitumen wirken und eine Veränderung des komplexen Schermoduls hervorrufen. In Bezug auf das Grundbitumen wird die Steifigkeit im Temperaturbereich ab 10 °C bis 30 °C durch die Modifizierung erhöht. Mit Reduzierung der Temperatur auf -10 °C ist eine Abnahme der Steifigkeiten im Verhältnis zu dem Grundbitumen zu beobachten. Dieser flache Kurvenverlauf ist typisch für elastomermodifizierte Bitumen.

Zur besseren Veranschaulichung des Einflusses der Heißlagerungszeiten auf den komplexen Schermodul, werden in Bild 49 der Tieftemperaturbereich von -10 °C bis 0 °C, in Bild 50 der Gebrauchstemperaturbereich von 50 °C bis 70 °C und in Bild 51 der Hochtemperaturbereich von 140 °C bis 150 °C abgebildet.

Für den Tieftemperaturbereich ist zu erkennen, dass analog zu den gummi-modifizierten Bitumen

vor der Rückgewinnung mit Zunahme der Heißlagerungszeit bis zu 32 Stunden eine Abnahme der Steifigkeit stattfindet. Bei der Heißlagerungszeit von 48 Stunden steigt die Steifigkeit wieder, während nach 72 Stunden Lagerung der komplexe Schermodul unter den anderen Verläufen liegt.

Im Gebrauchstemperaturbereich lässt sich keine eindeutige Reihenfolge mehr hinsichtlich der Heißlagerungszeiten feststellen. Generell sollte der komplexe Schermodul in diesem Temperaturbereich mit dem Erweichungspunkt Ring und Kugel vergleichbar sein, jedoch kann in dieser Untersuchungsreihe keine identische Reihung festgestellt werden.

Im Hochtemperaturbereich kehren sich im Vergleich zum Tieftemperaturbereich die Verläufe um. So steigt mit Zunahme der Heißlagerungszeit bis zu 72 Stunden die Steifigkeit an.

Bild 52 zeigt den Verlauf des Phasenwinkels über den gesamten geprüften Temperaturverlauf. Ent-

sprechend zu dem komplexen Schermodul nehmen die elastischen Anteile, in Form eines verringerten Phasenwinkels, mit der Gummimodifizierung zu. Bei den geringen Temperaturen und den hohen Temperaturen wird der Abstand zwischen den Phasenwinkeln des Grundbitumens und der modifizierten Varianten geringer.

Im Black-Diagramm (Bild 53) wird die Elastifizierung durch die Verlagerung der Kurvenverläufe deutlich. Mit der Modifizierung wird die Krümmung der Verläufe im mittleren Temperaturbereich ausgeprägter.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der extrahierten Bindemittel wird deutlich, dass sich messtechnisch zwar Unterschiede quantifizieren lassen, diese haben allerdings im Hinblick auf die Heißlagerungszeit größtenteils keine logische Reihenfolge bzw. stehen im Widerspruch zur erwarteten Reihenfolge. Somit kann anhand dieser Untersuchungsreihe festgehalten werden, dass die Heißlagerungszeiten scheinbar keine Auswirkungen auf die ungelösten

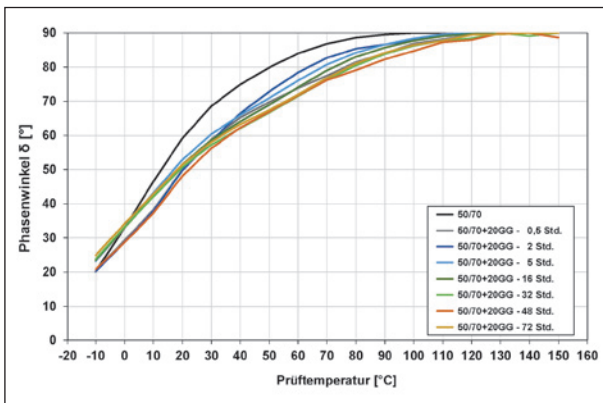


Bild 52: Phasenwinkel – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C

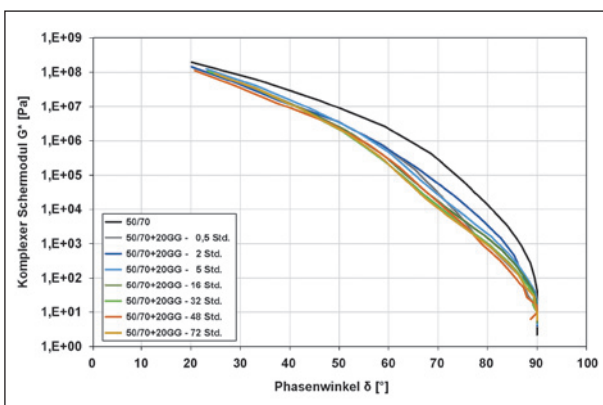


Bild 53: Black-Diagramm – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C

Gummipartikelanteile bzw. auf das Materialverhalten des Bitumens haben.

5.2.3 Veraschung

Da mit dem Extraktionsverfahren nach den [E GmBA, 2012] prüftechnisch kein hinreichend genaues Ergebnis zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes von gummimodifizierten Asphalten und zum ungelösten Gummipartikelanteil zu erzielen ist, wurde die Veraschung als alternative Methode untersucht. Dieses Verfahren ist unabhängig von der bisherigen Extraktion mit dem Lösemittel Trichlorethylen und hat damit Vorteile bezüglich der Arbeitssicherheit. Bei der Veraschung wird der organische Anteil durch thermische Beanspruchung mithilfe eines Muffelofens verbrannt. Bekanntermaßen tritt bei der hier vorgesehenen thermischen Beanspruchung auch ein mehr oder minder stark ausgeprägter Gewichtsverlust der Gesteinskörnungen auf. Um Geruchsauffälligkeiten und einer starken Rauchentwicklung zu begegnen, sollte die Veraschung unter einem Abzug durchgeführt werden.

Das Ziel der Veraschung ist es, das gummimodifizierte Asphaltmischgut zu veraschen und den verbleibenden mineralischen Anteil genügend genau zu bestimmen.

Um eine genau Herangehensweise für die Veraschung zu erarbeiten, wurden im ersten Schritt die zwei wesentlichen Ausgangsmaterialien des Asphaltmischgutes, das frische Gummimehl und die feine Gesteinskörnung Diabas 0/2, erhitzt. Die Ergebnisse sind tabellarisch in Tabelle 23 angegeben. Zu Beginn wurden die Materialien für 30 Minuten bei 800 °C der Hitze ausgesetzt. Es wurde festgestellt, dass diese Temperatur nicht ausgereicht hat, um das Gummimehl hinreichend zu verbrennen. Somit wurde die Temperatur auf 1.000 °C erhöht und das Material für weitere 30 Minuten und 75 Minuten verbrannt.

Temperatur [°C]	Dauer [Min]	Zeit [Min]	frisches Gummimehl		Diabas 0/2 [%]
			Probe 1 [%]	Probe 2 [%]	
20	0	0	100,0	100,0	100,0
800	30	30	24,9	21,7	94,7
1.000	30	60	8,4	7,9	86,9
1.000	75	135	8,1	7,9	86,9

Tab. 23: Veraschung der Ausgangsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen

Bild 54 veranschaulicht grafisch diesen Veraschungsvorgang. Nach 60 Minuten, zu Beginn bei einer Temperatur von 800 °C und anschließend bei 1.000 °C, sind die thermisch bedingten Gewichtsverluste abgeschlossen. Somit wurde für das weitere Vorgehen als optimale Veraschungszeit 75 Minuten bei einer Temperatur von 1.000 °C festgelegt.

Im nächsten Schritt wurden die weiteren verwendeten Gesteine, als Füller ein Kalkstein, als feine und grobe Gesteinskörnung Diabas, für 75 Minuten und 1.000 °C verascht. Die verbleibenden Anteile der jeweiligen Korngrößen sind der Tabelle 24 zu entnehmen. Auffällig ist der Kalkstein, der nur noch 56,9 % seiner Ausgangsmasse aufweist. Der Diabas 0/2 hat einen verbleibenden Anteil von 87,0 % und die grobe Gesteinskörnung des Diabas einen Anteil von 94,9 %.

Neben den Gesteinen wurde das frische Gummi-Granulat, das verwendete Grundbitumen 50/70 und ein hergestelltes gummimodifiziertes Bitumen 50/70 +15GG für 75 Minuten und 1.000 °C verascht. Die verbleibenden Anteile der jeweiligen Materialien sind der Tabelle 25 zu entnehmen. Wie zu erwarten verascht das Grundbitumen 50/70 vollständig. Das frische Gummi weist einen Restanteil von 8,0 % auf, während das 50/70+15GG noch 0,9 % seiner Ausgangsmasse aufweist.

Da das Grundbitumen 50/70 nachweislich zu 100 % verascht, verbleiben nach der Veraschung des Gummi-Bitumen-Gemisches 50/70+15GG von den eingebrachten 15 M.-% prozentual 6,0 % der Gummipartikel.

Die hier ermittelten Werte gelten nur für die verwendeten Materialien. Bei Nutzung von anderen Gesteinsarten oder differierenden Gummimehlen ist mit anderen Ergebnissen zu rechnen. Somit ist es zwingend erforderlich die verwendeten Ausgangsmaterialien einzeln zu veraschen und die Kennwerte für das weitere Vorgehen anzugeben.

Nach der Veraschung der Ausgangsmaterialien und Angabe der verbleibenden Anteile, kann mit der Veraschung des Asphaltes der Bindemittelgehalt ermittelt werden. Die Veraschung als Alternative zur Extraktion im Rahmen der Kontrollprüfung wurde für die Abschlussbaumaßnahme untersucht (vgl. Kapitel 5.3.2).

Um den Bindemittelgehalt von gummimodifizierten Asphalten über die Veraschung bei der Kontrollprüfung gezielt erfassen zu können, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

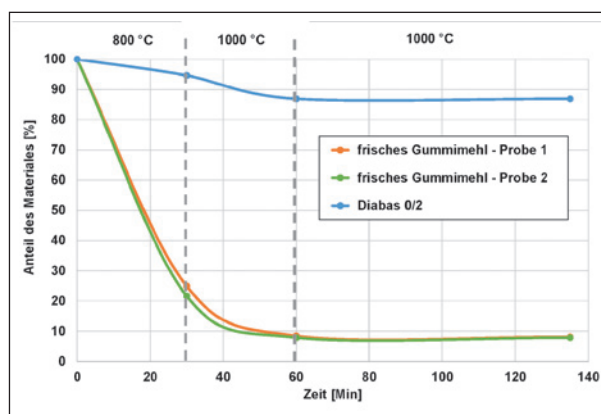


Bild 54: Veraschung der Ausgangsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen

Material	Anteil des Materials vor der Veraschung [%]	Anteil des Materials nach der Veraschung [%]
Füller– Kalkstein	100,0	56,9
0/2 – Diabas	100,0	87,0
2/5 – Diabas	100,0	94,9
5/8 – Diabas	100,0	94,9

Tab. 24: Veraschung der verwendeten Gesteine bei 1.000 °C

Material	Anteil des Materials vor der Veraschung [%]	Anteil des Materials nach der Veraschung [%]
frisches Gummimehl	100,0	8,0
50/70	100,0	0,0
50/70+15GG	100,0	0,9

Tab. 25: Veraschung der verwendeten Materialien für das gummimodifizierte Bindemittel bei 1.000 °C

Erstprüfung

1. Veraschung der verwendeten Ausgangsmaterialien (Gesteinskörnung und Gummimehl) für 75 Minuten bei 1.000 °C und Angabe des verbleibenden Anteiles,
2. Angabe der Zugabemengen der Gesteinskörnung und des Bindemittelanteiles auf 100 M.-%,
3. Ermittlung und Aufsummierung der verbleibenden Anteile der Zugabemengen über die in Punkt 1 bestimmten Anteile bei der Veraschung,
4. Veraschung des Asphaltes für 75 Minuten bei 1.000 °C und Angabe des verbleibenden Anteiles zu Vergleichszwecken.

Kontrollprüfung

5. Einsicht in die Angaben der Erstprüfung,
6. Veraschung des Asphaltes für 75 Minuten bei 1.000 °C Asphalt und Angabe des verbleibenden Anteiles,
7. Vergleich des verbleibenden Anteils mit dem Wert aus der Erstprüfung (Punkt 4),
8. Bestimmung der Kornverteilungslinie von dem verbleibenden Anteil aus der Veraschung und Ermittlung der „veraschten“ Zugabeanteile,
9. Verrechnung der „wahren“ Zugabeanteile über den verbleibenden Anteil des Asphaltes (Punkt 6) und die angegebenen verbleibenden Anteile der verwendeten Gesteinskörnungen aus der Erstprüfung (Punkt 1),
10. Berechnung des Bindemittelgehaltes über die Differenz.

Nach den [E GmBA, 2012] sind für das extrahierte rückgewonnene Bindemittel keine expliziten Anforderungen für die Eigenschaften einzuhalten, sondern nur Angaben zur Erfahrungssammlung zu erarbeiten. Diese Kennwerte sind sowohl für die Kontrollprüfung nicht relevant als auch für eine Aussage über die Qualität des gummimodifizierten Asphaltes nicht aussagekräftig. Insofern wäre eine Rückgewinnung des Bindemittels entbehrlich.

5.3 Baumaßnahmen

5.3.1 Baumaßnahmen – Teil 1

Neben den Extraktionen an den im Labor hergestellten Asphalten SMA 8 S und PA 8 entsprechend

den Untersuchungsvarianten nach Bild 4, wurden sechs verschiedene Baumaßnahmen, bei denen unterschiedliche gummimodifizierte Asphalte eingebaut wurden, begleitet. Zu dieser Begleitung zählte die Entnahme und Untersuchung von Asphaltmischgut. Die Entnahme des Mischgutes erfolgte jeweils direkt nach dem Mischen und nach einer Heißsilyerungszeit. Alle geprüften Asphalte wurden im Trockenverfahren modifiziert.

Tabelle 26 gibt einen Überblick über die bei den Baumaßnahmen eingebauten Mischgutsorten und eingesetzten gummimodifizierten Bindemittel. Aus den vorliegenden Erstprüfungen wurde der Bindemittelgehalt, der sich einschließlich des Gummimehlanteiles versteht, entnommen. Bei den gummimodifizierten Asphalten wurden unterschiedliche Gummimodifikatoren verwendet. Bei den Baumaßnahmen Nr. 1 bis Nr. 3 wurde trockenes Gummimehl eingesetzt, während bei den Baumaßnahmen Nr. 4 bis Nr. 6 mit Bitumen vorbehandelte Gummimehle zum Einsatz kamen.

Im Rahmen der Erstprüfungen der Baumaßnahmen Nr. 1 bis Nr. 4 wurde eine Extraktion nach den [E GmBA, 2012] durchgeführt, wobei der lösliche Bindemittelgehalt, der unlösliche Bindemittelgehalt und der ungelöste Gummipartikelanteil bestimmt wurden. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 27 angegeben. Es lässt sich feststellen, dass durchgehend ein höherer Bindemittelgehalt nach der Extraktion wiedergefunden wurde. Somit wurden z. B. bei der Baumaßnahme Nr. 3 der lösliche Bindemittelgehalt zu 6,78 M.-% und der ungelöste Gummipartikelanteil zu 0,84 M.-% bestimmt. Der unlösliche Bindemittelgehalt beträgt 0,26, sodass sich ein Gesamtbindemittelgehalt von 7,9 M.-% nach der

Nr.	Mischgutsorte	Modifizierungsverfahren	Grundbitumen	Gummimehlanteil [M.-%]	Bindemittelgehalt gemäß Erstprüfung [M.-%]	Ungelöster Gummipartikelanteil nach der Extraktion gemäß Erstprüfung [M.-%]	Löslicher Bindemittelgehalt nach der Extraktion gemäß Erstprüfung [M.-%]	Unlöslicher Bindemittelgehalt nach der Extraktion gemäß Erstprüfung [M.-%]
1	SMA 11 S	Trocken	50/70	10	6,4	0,52	6,10	-
2	SMA 11 S	Trocken	50/70	10	6,3	0,29	6,13	-
3	SMA 8 S	Trocken	50/70	10	7,5	0,84	6,78	0,26
4	SMA 8 S	Trocken	50/70	10 (vorbehandelt)	7,5	0,91	6,60	0,26
5	PA 8	Trocken	70/100	10 (vorbehandelt)	6,6	-	-	-
6	SMA 8 S	Trocken	30/45	10 (vorbehandelt)	7,1	-	-	-

Tab. 26: Erstprüfungswerte – begleitete Baumaßnahmen, Teil 1

Baumaßnahmen	Herstellung Asphalt im Trockenverfahren			Bindemittelgehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	Ungelöster Gummipartikelanteil [M.-%]	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]
	Bindemittel	Gummimehlanteil [M.-%]	Asphalt								
1	50/70	10	SMA 11 S	5,6	0,26	5,8	6,1	0,26	6,3	7,9	78,6
2	50/70	10	SMA 11 S	5,8	0,19	6,0	6,4	0,19	6,5	7,7	77,2
3	50/70	10	SMA 8 S	6,8	0,24	7,0	7,4	0,24	7,6	7,9	78,5
4	50/70	10	SMA 8 S	6,5	0,23	6,7	7,0	0,23	7,3	7,5	75,4
5	50/70	10	PA 8	6,0	0,16	6,2	6,4	0,16	6,6	7,2	72,3
6	30/45	10	SMA 8 S	6,7	0,21	6,9	7,2	0,21	7,5	7,8	77,8

Tab. 27: Durchgeführte Extraktionen – begleitete Baumaßnahmen, Teil 1

Extraktion ergibt. Der Bindemittelgehalt erhöht sich in diesem Fall um 0,4 M.-% zu dem vorher angegebenen Bindemittelgehalt von 7,5 M.-%. Als möglicher Grund dafür können Füllerrückstände oder Faserstoffrückstände im getrockneten Gummipartikelanteil vermutet werden.

Im Weiteren wurde das jeweils entnommene Mischgut zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes sowie des ungelösten Gummimehlanteils extrahiert. Dabei wurde der ungelöste Gummipartikelanteil wie unter Kapitel 4.2 beschrieben bestimmt. Die Extraktionen wurden dahingehend ausgewertet, dass der Bindemittelgehalt ohne Gummipartikelanteil, der Bindemittelgehalt mit Gummipartikelanteil und der ungelöste Gummipartikelanteil ermittelt wurden. Zusätzlich wurde der ungelöste Gummipartikelanteil, d. h. der getrocknete wiedergefundene Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge von 10 M.-% des Gummimehles im Bitumen berechnet. Die Ergebnisse sind der Tabelle 27 zu entnehmen.

Bei den Gummimodifizierungen der Baumaßnahmen Nr. 4 bis Nr. 6 handelt es sich um vorbehandelte Bitumengranulate unterschiedlicher Hersteller. Die genauen anteiligen Bestandteile sind nicht bekannt, sodass eine hinreichend genaue Analyse nicht gegeben ist. Um dies zu gewährleisten müssen die genauen Bestandteile des gummimodifizierten Bitumen angegeben werden.

Der in der Kontrollprüfung ermittelte Gesamtbindemittelgehalt inklusive der Gummipartikel entspricht weitestgehend dem Bindemittelgehalt aus der Erstprüfung. Es lässt sich keine Tendenz dahingehend feststellen, dass sich der Bindemittelgehalt nach der Extraktion durchgehend erhöht hat. Teilweise wird ein geringfügig niedrigerer Wert gefunden.

Die Ergebnisse zeigen hinsichtlich des ungelösten Gummipartikelanteils in [%] im Mittel einen Wert von ca. 75 %. Dieser Wert spiegelt die in dem vorherigen Untersuchungsprogramm ermittelten Durchschnittswerte für den ungelösten Gummipartikelanteils wider.

5.3.2 Abschlussbaumaßnahme

Als abschließende Baumaßnahme wurde eine Strecke innerorts begleitet, bei der sowohl die Asphaltbinderschicht als auch die Asphaltdeckschicht unter Verwendung von gummimodifizierten Bindemittel erneuert wurde.

Asphaltbinderschicht AC 16 B S

Die Asphaltbinderschicht wurde im Trockenverfahren hergestellt. Eingesetzt wurde ein AC 16 B S mit dem Grundbitumen 50/70 und 15 M.-% Gummimehl bezogen auf das Bindemittel.

Um den Einfluss unterschiedlicher Lagerungszeiten zu untersuchen, wurde für die Bindemittelgehaltsbestimmung Mischgut entsprechend Tabelle 28 nach drei verschiedenen Zeitpunkten entnommen. Weiterhin sind in Tabelle 29 die Mischguttemperaturen zum Zeitpunkt der Entnahme dokumentiert. Nach den Empfehlungen aus den [E GmBA, 2012] sollten die Temperaturen eine maximale Mischtemperatur von 170 °C nicht überschreiten. Mit einer Temperatur von 178 °C wurde dieser Grenzwert allerdings geringfügig überschritten.

Der Einbau der Asphaltbinderschicht ist in Bild 55 exemplarisch dokumentiert.

Entnahmeort	Lagerungszeit	Mischguttemperatur
Mischanlage LKW 1	50 Minuten nach Mischbeginn	178 °C
Baustelle LKW 1	85 Minuten nach Mischbeginn	170 °C
Baustelle LKW 2	115 Minuten nach Mischbeginn	168 °C

Tab. 28: Mischgutentnahme – AC 16 B S



Bild 55: Einbaubilder – AC 16 B S

Die Asphaltzusammensetzung und die Eigenschaften des AC 16 B S sind in der Erstprüfung (Tabelle 29) zusammengefasst.

Im Rahmen der Baubegleitung wurde eine Kontrollprüfung durchgeführt und die in Tabelle 30 aufgeführten Asphaltkenndaten bestimmt.

Im Weiteren wurde das jeweils entnommene Mischgut zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes sowie des ungelösten Gummipartikelanteils extrahiert. Dabei wurde der ungelöste Gummipartikelanteil wie unter Kapitel 4.2 beschrieben bestimmt. Die Extraktionen wurden dahingehend ausgewertet, dass der Bindemittelgehalt ohne Gummipartikelanteil, der Bindemittelgehalt mit Gummipartikelanteil und der ungelöste Gummipartikelanteil ermittelt wurden. Zu-

Asphaltkonzept		AC 16 B S
Zusammensetzung der Gesteinskörnungen		
Anteil Füller (Kalkstein)	[M.-%]	7,6
Feine Gesteinskörnung 0/2 (Diabas)	[M.-%]	16,0
Grobe Gesteinskörnung 2/5 (Diabas)	[M.-%]	8,0
Grobe Gesteinskörnung 5/8 (Diabas)	[M.-%]	6,0
Grobe Gesteinskörnung 8/11 (Diabas)	[M.-%]	13,0
Grobe Gesteinskörnung 11/16 (Diabas)	[M.-%]	34,4
Asphaltgranulat RA (SMA Binder)	[M.-%]	15,0
Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)		
22,4 mm	[M.-%]	100,0
16,0 mm	[M.-%]	97,6
11,2 mm	[M.-%]	68,3
8,0 mm	[M.-%]	51,5
5,6 mm	[M.-%]	42,0
2,0 mm	[M.-%]	29,3
0,125 mm	[M.-%]	12,5
0,063 mm	[M.-%]	9,6
Bindemittel und Zusätze		
Bindemittelsorte	[-]	50/70+15GG
Zugegebenes Bindemittel	[M.-%]	5,5
Gesamt-Bindemittelgehalt	[M.-%]	6,2
Erweichungspunkt Ring und Kugel (Neubitumen)	[°C]	50,0
Erweichungspunkt Ring und Kugel (am rückgewonnenen Bindemittel)	[°C]	61,2
Ungelöste Gummipartikel	[g]	19,4
Mischguteigenschaften		
Raumdicke MPK	[g/cm ³]	2,447
Rohdicke der Asphaltprobe	[g/cm ³]	2,536
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	3,5

Tab. 29: Erstprüfung – AC 16 B S

sätzlich wurde der ungelöste Gummipartikelanteil, d. h. der getrocknete wiedergefundene Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge von 15 M.-% des Gummimehles im Bitumen berechnet. Die Ergebnisse sind Tabelle 31 zu entnehmen.

Die Besonderheit dieser Asphaltbinderschicht ist, dass sowohl 15,0 M.-% Asphaltgranulat als auch Faserstoffe eingesetzt wurden.

Der in der Kontrollprüfung ermittelte Gesamtbindemittelgehalt (6,2 M.-% bis 6,5 M.-%) inklusive der Gummipartikel entspricht grundsätzlich dem Bindemittelgehalt (6,2 M.-%) aus der Erstprüfung.

Asphaltkonzept		AC 16 B S		
		Mischanlage LKW 1	Baustelle LKW 1	Baustelle LKW 2
Zusammensetzung der Gesteinskörnungen				
Anteil Füller (Kalkstein)	[M.-%]	8,5	8,8	8,4
Feine Gesteinskörnung 0/2 (Diabas)	[M.-%]	20,2	21,9	20,4
Grobe Gesteinskörnung 2/5 (Diabas)	[M.-%]	11,6	14,0	11,5
Grobe Gesteinskörnung 5/8 (Diabas)	[M.-%]	7,7	8,3	7,6
Grobe Gesteinskörnung 8/11 (Diabas)	[M.-%]	18,4	17,6	18,3
Grobe Gesteinskörnung 11/16 (Diabas)	[M.-%]	33,6	29,4	33,8
Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)				
22,4 mm	[M.-%]	100,0	100,0	100,0
16,0 mm	[M.-%]	97,0	98,9	96,9
11,2 mm	[M.-%]	66,4	70,6	66,2
8,0 mm	[M.-%]	48,0	53,0	47,9
5,6 mm	[M.-%]	40,3	44,7	40,3
2,0 mm	[M.-%]	28,7	30,7	28,8
0,125 mm	[M.-%]	10,0	10,7	9,9
0,063 mm	[M.-%]	8,5	8,8	8,4
Bindemittel und Zusätze				
Bindemittelsorte	[-]	50/70+15GG		
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	* siehe Tabelle 31		
Gummimehl	[M.-%]			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	[°C]	66,0	65,9	70,5
Nadelpenetration	[0,1 mm]	26,8	22,3	21,8
Mischguteigenschaften				
Raumdicke MPK	[g/cm³]	2,463	2,459	2,465
Rohdicke der Asphaltprobe	[g/cm³]	2,533	2,521	2,530
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	2,8	2,5	2,6

Tab. 30: Kontrollprüfung – AC 16 B S

Proben	Binde- mittel	Gummi- mehl- anteil [M.-%]	Asphalt	Binde- mittel- gehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Binde- mittel- gehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Binde- mittel- gehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Binde- mittel- gehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	Ungelöster Gummi- partikel- anteil [M.-%]	Ungelöster Gummi- partikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]
Misch- anlage LKW 1	50/70	15	AC 16 B S	5,5	0,22	5,8	6,3	0,22	6,5	11,2	74,6
Bau- stelle LKW 1	50/70	15	AC 16 B S	5,3	0,22	5,5	5,9	0,22	6,2	10,6	70,6
Bau- stelle LKW 2	50/70	15	AC 16 B S	5,3	0,22	5,5	6,0	0,22	6,2	11,0	73,2

Tab. 31: Durchgeführte Extraktionen – AC 16 B S

Die Ergebnisse weisen hinsichtlich des ungelösten Gummipartikelanteils in [%] einen Wertebereich von ca. 70 % – 75 % auf. Dieser Wert spiegelt die in

dem vorherigen Untersuchungsprogramm ermittelten Durchschnittswerte für den ungelösten Gummipartikelanteils wider. Es lässt sich kein grundlegen-



Bild 56: Faserstoffe in ungelösten Gummipartikeln

der Einfluss der Heißlagerungszeit feststellen. Die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Problematik, dass sich zusätzlich zu den ungelösten Gummipartikeln auch Fülleranteile wiederfinden lassen, die den Anteil an ungelösten Gummipartikeln verfälscht, wird in bei diesem Asphaltmischgut durch den Einsatz von Faserstoffen verstärkt.

Bild 56 veranschaulicht die wiedergefundenen ungelösten vernetzten Gummipartikel, an denen sich zusätzlich Fülleranteile und Faserstoffe angelagert haben.

Asphaltdeckschicht AC 5 D S LA

Die Asphaltdeckschicht wurde im Nassverfahren hergestellt. Eingesetzt wurde ein lärmindernder AC 5 D S LA mit dem gebrauchsfertigen gummimodifizierten Bindemittel GmB 65 NV+.

Um den Einfluss unterschiedlicher Lagerungszeiten zu untersuchen, wurde für die Bindemittelgehaltsbestimmung Mischgut entsprechend Tabelle 32 nach drei verschiedenen Zeitpunkten entnommen. Weiterhin sind in Tabelle 32 die Mischguttemperaturen zum Zeitpunkt der Entnahme dokumentiert. Mit einer maximal gemessenen Temperatur von 169 °C wird die empfohlene Höchsttemperatur von 170 °C nach den [E GmBA, 2012] eingehalten.

Der Einbau der Asphaltdeckschicht ist in Bild 57 exemplarisch dokumentiert.

Die Asphaltzusammensetzung und die Eigenschaften des AC 5 D S LA sind in der Erstprüfung (Tabelle 33) zusammengefasst.

Im Rahmen der Baubegleitung wurde eine Kontrollprüfung durchgeführt, um die in Tabelle 35 aufgeführten Asphaltkennwerte zu bestimmen.

Entnahmeort	Lagerungszeit	Mischguttemperatur
Mischanlage LKW 1	50 Minuten nach Mischbeginn	169 °C
Baustelle LKW 1	75 Minuten nach Mischbeginn	161 °C
Baustelle LKW 2	90 Minuten nach Mischbeginn	162 °C

Tab. 32: Mischgutentnahme – AC 5 D S LA



Bild 57: Einbaubilder – AC 5 D S LA

Im Weiteren wurde das jeweils entnommene Mischgut zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes sowie des ungelösten Gummipartikelanteils extrahiert. Dabei wurde der ungelöste Gummipartikelanteil wie unter Kapitel 4.2 beschrieben bestimmt. Die Extraktionen wurden dahingehend ausgewertet, dass der Bindemittelgehalt ohne Gummipartikelanteil, der Bindemittelgehalt mit Gummipartikelanteil und der ungelöste Gummipartikelanteil ermittelt wurden. Die Ergebnisse sind der Tabelle 34 zu entnehmen. Da ein gebrauchsfertiges gummimodifiziertes Bindemittel eingesetzt wurde, ist die genaue prozentuale Zusammensetzung von Bitumenanteil und Gummimehlanteil nicht bekannt. Es wird von einem Zugabeanteil von 15 M.-% bezogen auf das Bindemittel ausgegangen.

Der in der Kontrollprüfung ermittelte Gesamtbindemittelgehalt inklusive der Gummipartikel liegt für alle drei untersuchten Mischgüter bei 7,3 M.-% bis 7,4 M.-%. Demnach wurde im Vergleich zu dem Bindemittelgehalt aus der Erstprüfung von 7,1 M.-% nach der Extraktion ein etwas höherer Bindemittelgehalt wiedergefunden. Dies begründet sich allerdings wieder durch Füllerrückstände im getrockneten Gummipartikelanteil.

Asphaltkonzept		AC 5 D S LA
Zusammensetzung der Gesteinskörnungen		
Füller (Kalkstein)	[M.-%]	11,3
Feine Gesteinskörnung 0/2 (Diabas)	[M.-%]	27,8
Grobe Gesteinskörnung 2/5 (Diabas)	[M.-%]	60,9
Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)		
8,0 mm	[M.-%]	100,0
5,6 mm	[M.-%]	96,5
2,0 mm	[M.-%]	37,3
0,125 mm	[M.-%]	16,2
0,063 mm	[M.-%]	11,9
Bindemittel und Zusätze		
Bindemittelsorte	[-]	GmB 65 NV+
Bindemittelgehalt	[M.-%]	7,1
Erweichungspunkt Ring und Kugel (Neubitumen)	[°C]	85,0
Erweichungspunkt Ring und Kugel (am rückgewonnenen Bindemittel)	[°C]	83,0
Ungelöste Gummipartikel	[M.-%]	14,4
Mischguteigenschaften		
Raumdicke MPK	[g/cm ³]	2,365
Rohdicke der Asphaltprobe	[g/cm ³]	2,425
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	2,5

Tab. 33: Erstprüfung – AC 5 D S LA

Aufgrund weiterhin bestehender prüftechnischer Schwierigkeiten hinsichtlich der Bindemittelgehaltsbestimmung nach den [E GmBA, 2012], insbesondere hinsichtlich der Arbeitssicherheit, wurde die

Asphaltkonzept	AC 5 D S LA			
	Mischanlage LKW 1	Baustelle LKW 1	Baustelle LKW 2	
Zusammensetzung der Gesteinskörnungen				
Anteil Füller	[M.-%]	9,5	10,1	11,6
Anteil feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	22,0	22,1	21,5
Anteil grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	68,5	67,8	66,9
Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)				
8,0 mm	[M.-%]	100,0	100,0	100,0
5,6 mm	[M.-%]	98,7	98,7	98,5
2,0 mm	[M.-%]	31,5	32,2	33,1
0,125 mm	[M.-%]	12,1	12,4	13,8
0,063 mm	[M.-%]	9,5	10,1	11,6
Bindemittel und Zusätze				
Bindemittelsorte	[-]	GmB 65 NV+		
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	* siehe Tabelle 34		
Gummimehl	[M.-%]			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	[°C]	80,9	77,6	76,4
Nadelpenetration	[0,1mm]	18,3	30,3	20,7
Mischguteigenschaften				
Raumdicke MPK	[g/cm ³]	2,356	2,370	2,380
Rohdicke der Asphaltprobe	[g/cm ³]	2,451	2,457	2,459
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	3,9	3,5	3,2

Tab. 35: Kontrollprüfung – AC 5 D S LA

Proben	Bindemittel	Asphalt	Bindemittelgehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	Ungelöster Gummipartikelanteil [M.-%]	Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles [%]
Mischanlage LKW 1	GmB 65 NV+	AC 5 D S LA	6,3	0,23	6,5	7,0	0,23	7,3	10,5	70,0
Baustelle LKW 1	GmB 65 NV+	AC 5 D S LA	6,3	0,24	6,6	7,2	0,24	7,4	11,7	78,0
Baustelle LKW 2	GmB 65 NV+	AC 5 D S LA	6,3	0,25	6,5	7,1	0,25	7,4	11,6	77,3

Tab. 34: Durchgeführte Extraktionen – AC 5 D S LA

unter Kapitel 5.2.3 beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes mittels Veraschung auf diese Baumaßnahme übertragen und durchgeführt.

Nach der gestellten Vorgehensweise muss zu Beginn das verwendete Ausgangsmaterial (Gesteinskörnung und Gummimehl) separat für 75 Minuten bei 1.000 °C im Muffelofen verascht werden. Da das verwendete Ausgangsmaterial dem im Kapitel 5.2.3 veraschten Material entspricht, wurden diese Daten übernommen.

Anschließend erfolgte die Veraschung des Asphaltes ebenfalls für 75 Minuten bei 1.000 °C im Muffelofen. Wie beschrieben wurde Asphaltmischgut nach drei unterschiedlichen Zeitpunkten entnommen, sodass drei Veraschungen durchgeführt wurden. Die verbleibenden Anteile der Asphalte nach der Veraschung sind Tabelle 36 zu entnehmen. Diese liegen bei allen drei Asphalten bei ca. 82,5 %.

Tabelle 37 gibt die Zugabeanteile der Gesteinskörnung und den Bindemittelgehalt der Erstprüfung auf 100 M.-% wieder. In Tabelle 37 werden auch die Anteile der einzelnen Ausgangsmaterialien

Material	Anteil des Materials vor der Veraschung [%]	Anteil des Materials nach der Veraschung [%]
Mischanlage LKW 1	100,0	82,5
Baustelle LKW 1	100,0	82,3
Baustelle LKW 2	100,0	82,7

Tab. 36: Anteile der Asphalte nach der Veraschung – AC 5 D S LA

	Zugabemengen laut Erstprüfung [M.-%]		Anteil nach der Veraschung [%]	Anteil im Asphalt nach der Veraschung [M.-%]
Anteil Füller (Kalkstein)	11,3	10,5	56,9	6,0
Anteil feine Gesteinskörnung 0/2 mm (Diabas)	27,8	25,8	87,0	22,5
Anteil grobe Gesteinskörnung 2/5 mm (Diabas)	60,9	56,6	94,9	53,7
Bindemittelgehalt		7,1	0,9	0,064
Summe	100,0	100,0		82,2

Tab. 37: Veraschung der Einzelkomponenten des Asphaltes – AC 5 D S LA

nach der Veraschung angegeben. Aus diesen beiden Angaben wurde der verbleibende Anteil der Zugabemengen ermittelt und aufsummiert. Dieser theoretisch berechnete prozentuale Anteil von 82,2 % entspricht dem tatsächlichen Anteil nach der Veraschung der drei Asphaltproben (ca. 82,5 %). Der Anteil des Bindemittels auf dieses Ergebnis beträgt 0,064 M.-% und wäre als vernachlässigbar einzustufen.

Bei Einhaltung der Vorgehensweise scheint die Methode der Veraschung eine sinnvolle Alternative zu der Extraktion nach den [E GmBA, 2012] darzustellen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den derzeit eingesetzten Extraktionsanlagen führt die Bindemittelgehaltsbestimmung nach den [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2007] bei gummimodifiziertem Asphalt zu nicht hinreichend reproduzierbaren Ergebnissen.

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, Hinweise und Empfehlungen zur Verbesserung der Präzision bei der Bestimmung des Bindemittelgehaltes von gummimodifizierten Asphalten zu erarbeiten, um den Bindemittelgehalt bei einer Kontrollprüfung mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können.

Dazu wurden in einer ausführlichen Untersuchungsreihe die zwei Asphaltarten SMA 8 S und PA 8 sowohl im Nassverfahren als auch im Trockenverfahren mit Gummimehl modifiziert. Die Modifizierung erfolgte unter Variation des Grundbitumens und des Gummimehlanteils. Zusätzlich differierten die Bedingungen der Gummimodifizierung, sodass Einflüsse aus Mischtemperatur, Misch- und Lagerungszeit Berücksichtigung fanden. Diese hergestellten Asphalte wurden nach den [E GmBA, 2012] extrahiert und dahingehend ausgewertet, dass der Bindemittelgehalt ohne Gummipartikelanteil, der Bindemittelgehalt mit Gummipartikelanteil und der ungelöste Gummipartikelanteil ermittelt wurden. Zusätzlich wurde der ungelöste Gummipartikelanteil, d. h. der getrocknete wiedergefundene Gummipartikelanteil, bezogen auf die jeweilige Zugabemenge des Gummimehles im Bitumen (10 M.-%, 20 M.-% bzw. 30 M.-%) berechnet.

Generell ist die Bestimmung des Bindemittelgehaltes und der Bindemittelkennwerte nach den [E GmBA, 2012] ein kritischer Punkt. Bei der Extraktion von gummimodifizierten Asphalten löst sich nur ein Teil des dem Bindemittel zugesetzten Gummimehles im Bindemittel, ein anderer Teil verbleibt als ungelöster Gummipartikel im Gesteinskörnungsgemisch. Diese ungelösten Gummipartikel gilt es für eine hinreichend genaue Bindemittelgehaltsbestimmung möglichst präzise zu erfassen. Bei dieser Erfassung stößt die angewendete Vorgehensweise mit der automatisierten Extraktionsanlage an Grenzen. Die bisher gemachten Erfahrungen zeigen, dass das Verhältnis zwischen gelösten und ungelösten Gummipartikelanteilen nicht konstant ist. Dieser Anteil schwankt hauptsächlich in Abhängigkeit von dem eingebrachten Gummimehlanteil. Weitere Ursachen für die auftretenden Schwankungen sind die Gummimehlqualitäten. Durch das Recyceln von Altreifen entstehen zwangsläufig unterschiedliche Zusammensetzungen. Ebenso werden verschiedene Gummimehlprodukte mit differierenden herstellerbedingten Zusätzen bei der Modifizierung von Asphalten eingesetzt. Dadurch variiert der Anteil an gelösten und ungelösten Gummimehlanteilen und es entstehen weitere Unwägbarkeiten bei der Bindemittelgehaltsbestimmung.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich nach der Extraktion auf der einen Seite Fülleranteile und eventuell eingesetzte Faserstoffe in dem ungelösten Gummipartikelanteil befinden und sich auf der anderen Seite Gummipartikel im extrahierten Gesteinskörnungsgemisch wiederfinden lassen. Dies ist wiederum ein Auslöser für Schwankungen bei der Ermittlung des ungelösten Gummipartikelanteiles.

Anhand der durchgeführten Extraktionen wurden der Mittelwert und die zugehörigen Spannweiten, sowie eine Häufigkeitsverteilung über die ungelösten Gummipartikelanteile erstellt. Der Mittelwert der ungelösten Gummipartikel liegt bei 75,0 % , d. h. dass zunächst grob als mittlere Tendenz festgehalten werden kann, dass sich 25,0 % der Gummipartikel im Bitumen lösen. Wie durch die vorherigen Bewertungen zu erwarten, ergab sich jedoch eine große Spannweite von 43,1 % bis 107,4 %.

Die Herstellungsbedingungen, unabhängig vom Trocken- oder Nassverfahren und den Mischtemperaturen und Heißlagerungszeiten haben keine systematischen Auswirkungen auf die Erfassung des

Bindemittelgehaltes von Asphalten mit gummimodifizierten Bitumen bzw. dem ungelösten Gummipartikelanteil.

Prinzipiell sind bei Tätigkeiten mit dem Lösemittel Trichlorethylen strenge Arbeitsschutzbedingungen zu beachten. Um eine manuelle Probenvorbereitung, wie nach dem Vorgehen der [E GmBA, 2012] beschrieben, zu umgehen, sind automatisierte geschlossene Extraktionsanlagen in der Entwicklung, die die ungelösten Gummipartikel explizit präzise erfassen sollen und gleichzeitig die nötigen Arbeitsschutzbedingungen konkret erfüllen. Die hinreichende Funktionalität solcher Anlagen bleibt abzuwarten.

Mit dem Extraktionsverfahren nach den [E GmBA, 2012] scheint prüftechnisch kein hinreichend genaues Vorgehen zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes von gummimodifizierten Asphalten und zum ungelösten Gummipartikelanteil zu erzielen zu sein. Als alternative, vielversprechende Methode wurde die Veraschung solcher Asphalte eingesetzt. Dieses Verfahren ist unabhängig von der bisherigen Extraktion mit dem Lösemittel Trichlorethylen und den damit verbundenen einzuhaltenden Arbeitssicherheitsbestimmungen. Die empfohlene Vorgehensweise ist in Kapitel 5.2.3 beschrieben.

Erste Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zeigen plausible und vielversprechende Ergebnisse. Die ermittelten Werte gelten jedoch nur für die in diesen Untersuchungen verwendeten Materialien. Bei Verwendung von anderen Gesteinsarten oder differierenden Gummimehlen wird der verbleibende Anteil variieren. Somit ist es zwingend erforderlich, die jeweiligen verwendeten Ausgangsmaterialien einzeln zu veraschen und die Kennwerte für das weitere Vorgehen anzugeben.

Um das Verfahren der Veraschung zu optimieren und zu validieren, sind weitere Untersuchungsreihen notwendig. Hierzu sollte eine ausreichende Anzahl an Baustellen mit gummimodifizierten Asphalten prüftechnisch – wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben – begleitet werden.

Literatur

- ABDELRAHMAN, M.: Controlling performance of crumb rubber-modified binders through addition of polymer modifiers, *Transportation Research Record: Journal of the Transport Research Board*, No. 192, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., pp. 64-70, 2006
- CARLSON, D. D.; ZHU, H.: Asphalt-Rubber – An Anchor to Crumb Rubber Markets, 3. UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment, International Rubber Forum, Mexico, 1999
- DIN EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007
- DIN EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007
- DIN EN 12593: Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach FRAAß, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007
- DIN EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Terminologie, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2001
- DIN EN 13589: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Streckeigenschaften von modifiziertem Bitumen mit dem Kraft-Duktilitäts-Verfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2008
- DIN EN 13703: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Formänderungsarbeit, Beuth Verlag, Berlin, 2003
- DIN EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Beuth Verlag, Berlin, 2006
- DIN EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegeekriechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR), Beuth Verlag, Berlin, 2005
- E GmBA: Empfehlungen zu gummimodifizierten Bitumen und Asphalten, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Köln, 2012
- FGSV: Einsatz von Gummi in Bitumen – Offene Fragen, Stellungnahme der Arbeitsgruppe Asphaltstraße, FGSV, Straße und Autobahn, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003
- GOGOLIN, D.: Untersuchungen zur Rheologie bitumenhaltiger Bindemittel und deren Einfluss auf die lärmtechnischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten, Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, 2012
- NEUMANN, H.-J.; RAHIMIAN, I.: Über die Kolloidchemie des Bitumens, *Bitumen*, Heft 1, S. 1-5, 1973
- NÖSLER, I.: Beitrag zur prüftechnischen Ansprache des Haftverhaltens zwischen Mineralstoff und Bitumen, Dissertation, Universität-GH Wuppertal, 2000
- READ, J.; WHITEOAK, D.: *The SHELL Bitumen Handbook*, Thomas Telford Publishing, Fifth Edition, 2003
- RESCHNER, K.: Recycling von Altreifen und anderen Elastomeren, Eine Zusammenfassung der wichtigsten Verfahren und Anwendungen; 2012
- SABITA: Guidelines for the design, manufacture and construction of bitumen rubber asphalt wearing courses, Manual 19, 2. Edition, 2009
- SCHÄFER, V.; BEER, F.; KREIDE, M.: Polymermodifizierte Bindemittel nach den TL PmB 2001: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von elastomermodifiziertem und höher polymermodifiziertem Bitumen, *Asphalt*, Heft 8, S. 8-16, 2002
- SCHINKINGER, T.: Gummiasphalt, Vortrag anlässlich des 30. GESTRATA-Bauseminars 2004, *GESTRATA Journal*, 26. Jahrgang, Folge 105 (Juli), 2004
- SCHMIDT, H.: Über Gummi-Bitumen-Mischungen, *Bitumen*, Heft 6, 1953
- SCHNEIDER, U.: Polymermodifizierte Asphalte – Internationale Forschungsergebnisse der Modifizierungsmöglichkeiten und Eigenschaften, *Bitumen*, Heft 1, S. 14-20, 1992

TL Asphalt-StB 2007: Technische Lieferbedingungen für Asphaltgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

TL Bitumen-StB: Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymer-modifizierte Bitumen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Köln, 2007

TP Asphalt-StB, Teil 1: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 1: Bindemittelgehalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

TP Asphalt-StB, Teil 2: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 2: Korngrößenverteilung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

TP Asphalt-StB, Teil 5: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 5: Rohdichte von Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

TP Asphalt-StB, Teil 6: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 35: Raumdichte von Asphaltprobekörpern, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

TP Asphalt-StB, Teil 35: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 35: Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

WAY, G. B.: Flagstaff I-40 Asphalt Rubber Overlay Project, Nine Years of Success, Arizona Department of Transportation, Transportation Research Board, 78. Annual Meeting, 1999

ZENKE, G.: Stoffbestand und Verhalten von Bitumen – Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (I), Zeitschrift Bitumen, Heft 3/1990

Bilder

Bild 1: Polymergruppen

Bild 2: Verlauf der Bitumen-Gummi-Interaktion bei hohen Temperaturen: (a) Veränderung der Viskosität, (b) Veränderung der Partikelgröße und (c) Veränderung der Bitumenmatrix in Anlehnung an [ABDELRAHMAN, 2006]

Bild 3: Begriffe bei der Modifizierung von Bitumen und Asphalt mit Gummimehl bzw. -granulat [E GmBA, 2012]

Bild 4: Untersuchungsvarianten

Bild 5: Korngrößenverteilung des hergestellten SMA 8 S inklusive der Anforderungsgrenzen gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

Bild 6: Korngrößenverteilung des hergestellten PA 8 inklusive der Anforderungsgrenzen gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

Bild 7: Geräteskizze zur Herstellung von gummi-modifizierten Bitumen aus Straßenbaubitumen und Gummimehl [E GmBA, 2012]

Bild 8: Feine extrahierte Gesteinskörnung mit Gummipartikeln

Bild 9: Mit Wasser getrennte Gummipartikel von den Gesteinskörnungen

Bild 10: Abgesiebte Kornklasse 5/8 mm

Bild 11: Mikroskopaufnahme eines Gesteinskorns mit Sandrückständen

Bild 12: Muffelofen zur Veraschung

Bild 13: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Trockenverfahren komplett

Bild 14: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren komplett

Bild 15: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren, Herstellungsbedingungen des gummi-modifizierten Bitumens

Bild 16: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren, Herstellungsbedingungen des gummi-modifizierten Asphaltes

- Bild 17: Siedeanalyse der Bitumensorten 50/70 und 70/100
- Bild 18: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)
- Bild 19: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)
- Bild 20: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)
- Bild 21: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)
- Bild 22: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)
- Bild 23: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)
- Bild 24: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)
- Bild 25: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)
- Bild 26: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)
- Bild 27: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)
- Bild 28: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)
- Bild 29: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)
- Bild 30: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit gebrauchsfertigem gummimodifizierten Bindemittel)
- Bild 31: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit gebrauchsfertigem gummimodifizierten Bindemittel)
- Bild 32: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Trockenverfahren SMA 8 S, N = 24
- Bild 33: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Trockenverfahren PA 8, N = 8
- Bild 34: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nassverfahren SMA 8 S, N = 69

- Bild 35: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nassverfahren PA 8, N = 32
- Bild 36: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S, N = 93
- Bild 37: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren PA 8, N = 40
- Bild 38: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S und PA 8, N = 133
- Bild 39: Fülleranteile in ungelösten Gummipartikeln
- Bild 40: Gummipartikel in Gesteinskörnungen
- Bild 41: Geschlossene Extraktionsanlage – Hersteller 1
- Bild 42: Geschlossene Extraktionsanlage – Hersteller 2
- Bild 43: Komplexer Schermodul – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C
- Bild 44: Komplexer Schermodul – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Tieftemperaturbereich -10 °C bis 0 °C
- Bild 45: Komplexer Schermodul – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Hochtemperaturbereich von 80 °C bis 90 °C
- Bild 46: Phasenwinkel – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C
- Bild 47: Black-Diagramm – gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C
- Bild 48: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C
- Bild 49: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Tieftemperaturbereich -10 °C bis 0 °C
- Bild 50: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Gebrauchstemperaturbereich 50 °C bis 70 °C
- Bild 51: Komplexer Schermodul – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Hochtemperaturbereich von 140 °C bis 150 °C
- Bild 52: Phasenwinkel – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich 10 °C bis 150 °C
- Bild 53: Black-Diagramm – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich 10 °C bis 150 °C
- Bild 54: Veraschung der Ausgangsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen
- Bild 55: Einbaubilder – AC 16 B S
- Bild 56: Faserstoffe in ungelösten Gummipartikeln
- Bild 57: Einbaubilder – AC 5 D S LA

Tabellen

- Tab. 1: Bestimmung des gelösten Gummipartikelanteils im Bitumen-Gummimehl-Gemisch
- Tab. 2: Zusammensetzung des hergestellten SMA 8 S gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]
- Tab. 3: Zusammensetzung des hergestellten PA 8 gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]
- Tab. 4: Bindemittel- und Gummimehlanteile im Asphaltmischgut des hergestellten SMA 8 S

-
- | | |
|--|--|
| Tab. 5: Bindemittel- und Gummimehlanteile im Asphaltmischgut des hergestellten PA 8 | Tab. 23: Veraschung der Ausgangsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen |
| Tab. 6: Durchgeführte Untersuchungen an den extrahierten Bindemittelvarianten | Tab. 24: Veraschung der verwendeten Gesteine bei 1.000 °C |
| Tab. 7: Prüfparameter zur Bestimmung der rheologischen Bitumenkennwerte mit dem DSR | Tab. 25: Veraschung der verwendeten Materialien für das gummimodifizierte Bindemittel bei 1.000 °C |
| Tab. 8: Ermittelte Kenndaten am entnommenen Mischgut | Tab. 26: Erstprüfungswerte – begleitete Baumaßnahmen, Teil 1 |
| Tab. 9: Erst- und Kontrollprüfung an PA 8 | Tab. 27: Durchgeführte Extraktionen – begleitete Baumaßnahmen, Teil 1 |
| Tab. 10: Erst- und Kontrollprüfung an SMA 11 S | Tab. 28: Mischgutentnahme – AC 16 B S |
| Tab. 11: Erst- und Kontrollprüfung an AC 16 B S | Tab. 29: Erstprüfung – AC 16 B S |
| Tab. 12: Ergebnisse der chemischen Analyse der Bitumensorten 50/70 und 70/100 – Spannweiten | Tab. 30: Kontrollprüfung – AC 16 B S |
| Tab. 13: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Trockenverfahren SMA 8 S | Tab. 31: Durchgeführte Extraktionen – AC 16 B S |
| Tab. 14: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Trockenverfahren PA 8 | Tab. 32: Mischgutentnahme – AC 5 D S LA |
| Tab. 15: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nassverfahren SMA 8 S | Tab. 33: Erstprüfung – AC 5 D S LA |
| Tab. 16: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nassverfahren SMA 8 S | Tab. 34: Durchgeführte Extraktionen – AC 5 D S LA |
| Tab. 17: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S | Tab. 35: Kontrollprüfung – AC 5 D S LA |
| Tab. 18: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nass- und Trockenverfahren PA 8 | Tab. 36: Anteile der Asphalte nach der Veraschung – AC 5 D S LA |
| Tab. 19: Ungelöster Gummipartikelanteil und Bindemittelgehalt – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S und PA 8 | Tab. 37: Veraschung der Einzelkomponenten des Asphaltes – AC 5 D S LA |
| Tab. 20: Ungelöster Gummipartikelanteil in Abhängigkeit von den Heißlagerungszeiten | |
| Tab. 21: Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70 | |
| Tab. 22: Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel in Abhängigkeit von den Heißlagerungszeiten – extrahiertes gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG | |

Anhang

Proben	Herstellung gummi-modifizierter Asphalt im Trockenverfahren				Bindemittel-gehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittel-gehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	ungelöste gummi-partikelanteil [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehls [%]
	Bindemittel	Gummi-mehl-anteil [M.-%]	Asphalt	Misch-temperatur [°C]								
1	50/70	10	SMA 8 S	170	1	6,0	0,25	6,3	6,5	6,8	7,3	73,1
2	50/70	10	SMA 8 S	170	3	6,2	0,25	6,5	6,7	7,0	6,9	69,4
3	50/70	10	SMA 8 S	190	1	6,0	0,25	6,2	6,5	6,7	7,3	72,7
4	50/70	10	SMA 8 S	190	3	6,1	0,25	6,3	6,5	6,8	6,7	66,6
5	50/70	20	SMA 8 S	170	1	5,7	0,25	5,9	6,8	7,1	15,7	78,5
6	50/70	20	SMA 8 S	170	3	5,6	0,25	5,8	6,6	6,8	14,7	73,4
7	50/70	20	SMA 8 S	190	1	5,9	0,25	6,1	6,8	7,0	13,1	65,4
8	50/70	20	SMA 8 S	190	3	5,7	0,24	5,9	6,8	7,0	15,8	78,9
9	50/70	10	SMA 8 S	150	1	6,3	0,23	6,5	6,9	7,1	8,7	86,5
10	50/70	10	SMA 8 S	150	3	6,4	0,22	6,6	6,9	7,1	7,1	70,9
11	50/70	20	SMA 8 S	150	1	5,8	0,23	6,1	7,0	7,2	16,1	80,7
12	50/70	20	SMA 8 S	150	3	5,8	0,23	6,0	6,9	7,1	15,6	78,0
13	70/100	10	SMA 8 S	150	1	6,4	0,23	6,7	7,0	7,2	7,7	77,5
14	70/100	10	SMA 8 S	150	3	6,3	0,23	6,6	6,9	7,1	7,9	78,6
15	70/100	10	SMA 8 S	170	1	6,3	0,22	6,6	6,9	7,1	7,9	78,7
16	70/100	10	SMA 8 S	170	3	6,6	0,22	6,8	7,0	7,3	6,2	61,5
17	70/100	20	SMA 8 S	150	1	5,6	0,22	5,9	6,9	7,1	17,3	86,6
18	70/100	20	SMA 8 S	150	3	5,9	0,22	6,1	6,9	7,1	14,8	74,2
19	70/100	20	SMA 8 S	170	1	5,5	0,24	5,7	6,6	6,8	16,3	81,7
20	70/100	20	SMA 8 S	170	3	6,1	0,22	6,3	7,1	7,4	14,4	72,0
21	70/100	30	SMA 8 S	150	1	5,3	0,22	5,6	7,3	7,5	25,9	86,5
22	70/100	30	SMA 8 S	150	3	5,6	0,23	5,9	7,1	7,4	20,4	68,1
23	70/100	30	SMA 8 S	170	1	5,1	0,24	5,3	6,8	7,1	25,1	83,8
24	70/100	30	SMA 8 S	170	3	5,5	0,23	5,7	7,1	7,3	22,1	73,7

Tab. A 1: Durchgeführte Extraktionen – SMA 8S hergestellt im Trockenverfahren

Proben	Herstellung gummi-modifizierter Asphalt im Trockenverfahren				Bindemittel-gehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittel-gehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehls [%]
	Bindemittel	Gummi-mehl-anteil [M.-%]	Asphalt	Misch-temperatur [°C]								
1	70/100	20	PA 8	150	1	5,7	0,15	5,9	6,5	6,7	11,7	58,5
2	70/100	20	PA 8	150	3	5,6	0,15	5,8	6,4	6,6	11,9	59,4
3	70/100	30	PA 8	150	1	5,1	0,16	5,2	6,5	6,7	21,7	72,3
4	70/100	30	PA 8	150	3	5,3	0,13	5,5	6,3	6,4	14,6	48,7
5	50/70	10	PA 8	150	1	6,1	0,15	6,2	6,6	6,8	8,2	82,1
6	50/70	10	PA 8	150	3	5,8	0,16	6,0	6,3	6,4	7,0	69,7
7	50/70	20	PA 8	150	1	5,2	0,16	5,3	6,4	6,5	18,7	93,3
8	50/70	20	PA 8	150	3	5,7	0,15	5,8	6,6	6,8	14,7	73,3

Tab. A 2: Durchgeführte Extraktionen – PA 8 hergestellt im Trockenverfahren

Proben	Herstellung gummi-modifiziertes Bitumen (GmB)						Herstellung gummi-modifizierter Asphalt mit GmB			Bindemittelgehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt mit Gummi [M.-%]	unge löste Gummi-partikelanteil [M.-%]	unge löste Gummi-partikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehls [%]
	Bindemittel	Gummi-mehl-anteil [M.-%]	Misch-temperatur [°C]	Mischzeit [h]	Lagerungszeit [Min]	Asphalt	Misch-temperatur [°C]	Lagerungszeit [h]	Bindemittelgehalt ohne Gummi [M.-%]							
1	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,5	0,2	7,0	0,2	7,3	7,0	70,2	
2	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	1	6,4	0,2	6,8	0,2	7,1	5,6	56,5	
3	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	1	6,4	0,2	6,9	0,2	7,2	7,7	76,6	
4	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,2	0,2	6,7	0,2	6,9	6,7	67,3	
5	50/70	20	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,2	0,2	6,9	0,2	7,2	9,5	47,3	
6	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,9	0,2	7,1	13,8	69,1	
7	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	7,1	0,2	7,4	17,3	86,4	
8	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	1	5,6	0,3	6,9	0,3	7,2	19,0	94,9	
9	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	3	6,1	0,2	6,5	0,2	6,7	5,6	56,4	
10	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	3	6,2	0,2	6,6	0,2	6,6	4,5	45,0	
11	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,2	0,2	6,6	0,2	6,9	6,3	62,7	
12	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	3	6,2	0,2	6,6	0,2	6,9	6,5	65,3	
13	50/70	20	180	1	30	SMA 8 S	170	3	5,8	0,2	6,1	0,2	7,1	14,5	72,4	
14	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	3	6,0	0,2	6,8	0,2	7,0	11,1	55,6	
15	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	3	5,7	0,2	6,9	0,2	7,2	17,3	86,3	
16	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	3	5,8	0,2	6,1	0,2	7,0	14,0	69,8	
17	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,4	0,3	6,8	0,3	7,0	5,7	56,6	
18	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,1	0,3	6,6	0,3	6,9	7,4	74,0	
19	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	1	6,2	0,3	6,5	0,3	7,2	9,8	97,8	
20	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	1	6,4	0,3	7,2	0,3	7,5	10,7	107,4	
21	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	1	6,5	0,3	6,9	0,3	7,2	5,6	55,8	
22	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,5	0,2	7,1	0,2	7,3	7,5	75,5	
23	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,2	0,3	6,8	0,3	7,0	8,6	86,2	
24	50/70	20	180	1	30	SMA 8 S	170	1	5,8	0,3	6,1	0,3	7,1	14,8	74,0	
25	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	1	5,7	0,3	6,6	0,3	6,9	13,1	65,7	
26	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	1	5,8	0,2	6,7	0,2	7,0	12,9	64,4	
27	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,9	0,2	7,2	14,0	69,9	
28	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	1	6,0	0,3	7,2	0,3	7,4	16,5	82,5	
29	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,0	0,3	6,7	0,3	7,0	10,1	50,3	
30	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	3	6,3	0,3	6,6	0,3	7,1	7,1	70,8	
31	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	3	6,4	0,3	6,7	0,3	7,0	4,3	43,1	
32	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,1	0,3	6,8	0,3	7,0	9,9	99,2	
33	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,5	0,3	7,0	0,3	7,2	6,9	69,0	
34	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	3	6,5	0,2	7,1	0,2	7,4	8,2	81,6	
35	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	3	6,2	0,3	6,9	0,3	7,2	10,5	104,9	
36	50/70	20	180	1	30	SMA 8 S	170	3	6,3	0,3	7,3	0,3	7,6	14,0	70,1	
37	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	3	5,8	0,3	6,1	0,3	7,2	15,1	75,4	
38	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,0	0,3	6,9	0,3	7,1	12,6	63,0	
39	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	3	5,7	0,3	6,7	0,3	6,9	13,5	67,5	
40	50/70	10	180	1	24 Std.	SMA 8 S	170	1	6,4	0,3	7,0	0,3	7,3	8,3	82,6	
41	50/70	20	180	1	24 Std.	SMA 8 S	170	1	6,0	0,3	7,1	0,3	7,4	14,9	74,7	

Tab. A 3: Durchgeführte Extraktionen – SMA 8 S hergestellt im Nassverfahren, Teil 1

Proben	Herstellung gumminodifiziertes Bitumen (GmB)					Herstellung gumminodifizierter Asphalt mit GmB			Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	ungelöste Gummipartikelanteil [M.-%]	ungelöste Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehls [%]
	Bindemittel	Gummimehlanteil [M.-%]	Mischtemperatur [°C]	Mischzeit [h]	Lagerungszeit [Min]	Asphalt	Mischtemperatur [°C]	Lagerungszeit [h]								
42	70/100	10	160	1	90	SMA 8 S	150	1	6,9	0,2	7,1	7,4	0,2	7,6	6,6	65,7
43	70/100	10	160	1	90	SMA 8 S	170	1	6,7	0,2	6,9	7,2	0,2	7,4	6,8	67,7
44	70/100	20	160	1	90	SMA 8 S	150	1	6,0	0,2	6,2	7,1	0,2	7,3	16,0	79,8
45	70/100	20	160	1	90	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,1	7,0	0,2	7,2	15,4	76,8
46	70/100	30	160	1	90	SMA 8 S	150	1	5,5	0,2	5,7	7,1	0,2	7,3	21,4	71,2
47	70/100	30	160	1	90	SMA 8 S	170	1	6,0	0,2	6,2	7,3	0,2	7,5	17,0	56,8
48	70/100	10	160	1	48 Std	SMA 8 S	150	1	5,5	0,2	5,7	6,1	0,2	6,3	9,7	97,2
49	70/100	10	160	1	48 Std	SMA 8 S	170	1	6,2	0,2	6,4	6,7	0,2	6,9	7,3	73,3
50	70/100	20	160	1	48 Std	SMA 8 S	150	1	5,3	0,2	5,6	6,3	0,2	6,5	15,2	76,1
51	70/100	20	160	1	48 Std	SMA 8 S	170	1	5,8	0,2	6,1	7,0	0,2	7,3	16,1	80,6
52	70/100	30	160	1	48 Std	SMA 8 S	150	1	5,5	0,3	5,8	6,7	0,3	7,0	17,5	58,4
53	70/100	30	160	1	48 Std	SMA 8 S	170	1	5,5	0,2	5,8	6,7	0,2	6,9	16,9	56,3
54	70/100	10	160	1	90	SMA 8 S	150	3	6,4	0,2	6,6	6,8	0,2	7,1	6,3	63,4
55	70/100	10	160	1	90	SMA 8 S	170	3	6,4	0,2	6,6	7,0	0,2	7,2	7,8	77,7
56	70/100	20	160	1	90	SMA 8 S	150	3	5,4	0,3	5,6	6,5	0,3	6,8	17,1	85,6
57	70/100	20	160	1	90	SMA 8 S	170	3	6,0	0,2	6,2	7,1	0,2	7,3	15,3	76,3
58	70/100	30	160	1	90	SMA 8 S	150	3	6,0	0,2	6,2	7,5	0,2	7,7	19,4	64,6
59	70/100	30	160	1	90	SMA 8 S	170	3	5,3	0,2	5,5	7,0	0,2	7,3	23,8	79,2
60	70/100	10	180	1	90	SMA 8 S	150	1	6,3	0,2	6,5	7,0	0,2	7,2	9,3	92,9
61	70/100	10	180	1	90	SMA 8 S	170	1	6,4	0,2	6,6	6,9	0,2	7,1	7,1	71,0
62	70/100	30	180	1	90	SMA 8 S	150	1	5,3	0,2	5,5	7,1	0,2	7,3	24,4	81,3
63	70/100	30	180	1	90	SMA 8 S	170	1	5,2	0,2	5,5	7,0	0,2	7,2	24,0	80,0
64	70/100	10	180	1	90	SMA 8 S	150	3	6,5	0,2	6,7	6,9	0,2	7,1	6,2	62,4
65	70/100	30	180	1	90	SMA 8 S	150	3	5,7	0,2	5,9	7,3	0,2	7,5	21,5	71,6
66	GmB _{festig}	15	x	x	x	SMA 8 S	170	1	6,3	0,3	6,6	6,9	0,3	7,2	8,6	57,0
67	GmB _{festig}	15	x	x	x	SMA 8 S	170	3	6,3	0,2	6,5	6,8	0,2	7,0	7,2	47,7
68	GmB _{festig}	15	x	x	x	SMA 8 S	190	1	6,1	0,3	6,3	6,6	0,3	6,8	7,6	50,8
69	GmB _{festig}	15	x	x	x	SMA 8 S	190	3	6,0	0,2	6,2	6,8	0,2	7,1	12,0	79,9

Tab. A 4: Durchgeführte Extraktionen – SMA 8 S hergestellt im Nassverfahren, Teil 2

Proben	Herstellung gumminodifiziertes Bitumen (GmB)					Herstellung gumminodifizierter Asphalt mit GmB			Bindemittelgehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Bindemittelgehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehls [%]
	Bindemittel	Gummi-mehl-anteil [M.-%]	Misch-temperatur [°C]	Mischzeit [h]	Lagerungs-zeit [Min]	Asphalt	Misch-temperatur [°C]	Lagerungs-zeit [h]								
1	70/100	20	160	2	30	PA.8	170	1	5,3	0,17	5,5	6,5	0,17	6,6	17,5	87,3
2	70/100	20	160	2	30	PA.8	170	1	5,4	0,16	5,5	6,9	0,16	7,0	20,8	104,1
3	70/100	20	160	2	120	PA.8	170	1	5,5	0,16	5,7	6,3	0,16	6,5	12,4	62,1
4	70/100	20	160	2	120	PA.8	170	1	5,4	0,16	5,5	6,6	0,16	6,7	17,9	89,3
5	70/100	20	180	2	30	PA.8	170	1	5,1	0,16	5,2	6,3	0,16	6,4	18,7	93,6
6	70/100	20	180	2	30	PA.8	170	1	5,3	0,16	5,5	6,7	0,16	6,4	14,8	74,1
7	70/100	20	180	2	120	PA.8	170	1	5,3	0,16	5,5	6,3	0,16	6,9	20,5	102,4
8	70/100	20	180	2	120	PA.8	170	1	5,4	0,16	5,5	6,4	0,16	6,5	15,4	77,0
9	70/100	20	160	2	30	PA.8	150	1	5,3	0,17	5,4	6,1	0,17	6,3	12,9	64,5
10	70/100	20	160	2	30	PA.8	150	1	5,4	0,16	5,5	6,4	0,16	6,5	15,4	77,2
11	70/100	20	160	2	120	PA.8	150	1	5,0	0,17	5,2	6,0	0,17	6,2	16,2	81,1
12	70/100	20	160	2	120	PA.8	150	1	5,2	0,17	5,4	6,3	0,17	6,5	17,0	84,9
13	70/100	20	180	2	30	PA.8	150	1	5,1	0,17	5,2	6,1	0,17	6,3	16,8	84,2
14	70/100	20	180	2	30	PA.8	150	1	5,2	0,16	5,4	6,5	0,16	6,7	19,2	95,8
15	70/100	20	180	2	120	PA.8	150	1	5,0	0,17	5,2	6,0	0,17	6,2	16,2	81,0
16	70/100	20	180	2	120	PA.8	150	1	5,2	0,16	5,4	6,5	0,16	6,7	19,6	98,2
18	50/70	20	160	2	30	PA.8	170	1	5,3	0,17	5,5	6,3	0,17	6,4	15,3	76,5
19	50/70	20	160	2	30	PA.8	170	1	5,2	0,17	5,4	6,4	0,17	6,6	18,1	90,3
20	50/70	20	160	2	120	PA.8	170	1	5,1	0,17	5,2	6,3	0,17	6,4	18,8	93,8
21	50/70	20	160	2	120	PA.8	170	1	4,8	0,17	5,0	6,1	0,17	6,2	20,3	101,7
22	50/70	20	180	2	30	PA.8	170	1	5,3	0,17	5,5	6,3	0,17	6,5	15,5	77,7
23	50/70	20	180	2	30	PA.8	170	1	5,1	0,16	5,3	6,6	0,16	6,7	21,3	106,7
24	50/70	20	180	2	120	PA.8	170	1	5,3	0,16	5,4	6,3	0,16	6,5	16,1	80,3
25	50/70	20	180	2	120	PA.8	170	1	5,1	0,16	5,3	6,4	0,16	6,5	18,6	92,8
26	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	150	1	5,2	0,16	5,4	5,9	0,16	6,1	11,2	74,4
27	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	150	1	5,7	0,17	5,8	6,4	0,17	6,6	11,6	77,4
28	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	150	3	5,5	0,16	5,6	6,1	0,16	6,3	10,3	68,6
29	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	150	3	5,4	0,16	5,6	6,1	0,16	6,2	10,4	69,0
30	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	170	1	5,4	0,17	5,6	6,0	0,17	6,1	9,1	60,4
31	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	170	1	5,5	0,16	5,7	6,2	0,16	6,3	10,0	67,0
32	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	170	3	5,5	0,17	5,6	6,1	0,17	6,3	11,0	73,2
33	GmB _{erig}	15	x	x	x	PA.8	170	3	5,3	0,16	5,5	6,1	0,16	6,2	12,1	81,0

Tab. A 5: Durchgeführte Extraktionen – PA 8 hergestellt im Nassverfahren

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2016

S 97: Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel

Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

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

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

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

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

Wacker, Scherkenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 – 2013

Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

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 <http://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 <http://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 <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungsrolle von Asphalt

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt

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

2018

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

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

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

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehlung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau

Böhm, Tiemann, Ulrich, Verges, Muschalla
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://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 <http://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 <http://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, Scherckenbach, Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: **Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften 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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 03-63

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.