

**Abschlussbericht zum FE 07.0247/2011/AGB:
„Ermittlung des Bindemittelgehaltes von
Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel“**

„Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel“

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg

Dipl.-Ing. Ricarda Manke

November 2014

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	7
2	Zielsetzung	7
3	Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse	8
3.1	Bitumenhaltiges Bindemittel	8
3.1.1	Bitumen	8
3.1.2	Modifizierung von Bitumen	9
3.2	Gummimodifizierter Asphalt	9
3.2.1	Geschichtliche Entwicklung	9
3.2.2	Herstellung	10
3.2.3	Bestimmung des Bindemittelgehaltes	11
4	Untersuchungsprogramm	12
4.1	Erkenntnisse aus Baumaßnahmen mit Gummimodifizierten Asphalten	12
4.2	Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes	12
4.2.1	Zusammensetzung der Asphaltvarianten	13
4.2.2	Herstellung der Gummimodifizierten Asphalte	14
4.2.3	Extraktion und Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach [E GmBA, 2012]	15
4.2.4	Weitere Untersuchungen zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes	15
4.3	Baumaßnahmen	18
5	Untersuchungsergebnisse und -bewertung	19
5.1	Analyse von ausgeführten Baumaßnahmen mit Gummimodifizierten Asphalten	19
5.2	Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes	19
5.2.1	Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach [E GmBA, 2012]	19
5.2.2	Untersuchungen am hergestellten Gummimodifizierten Bitumen	30
5.2.3	Veraschung	34
5.3	Baumaßnahmen	36
5.3.1	Baumaßnahmen – Teil 1	36
5.3.2	Abschlussbaumaßnahme	38
6	Zusammenfassung und Ausblick	43
7	Literatur	45
	Anhang	47

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 Bindemittelgehalt 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 1980er Jahre 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 bitumen-haltiges Bindemittel grundsätzlich in Straßenbaubitumen 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.

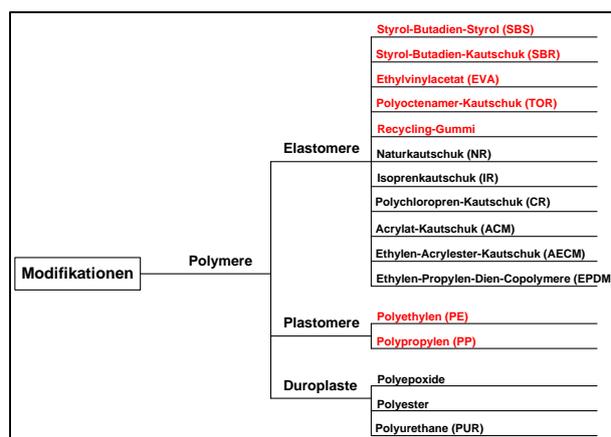


Bild 1: Polymergruppen

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 1990iger 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 Offenerporigem 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 Synthesekautschuk 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 die Gummipartikel bis zur doppelten Größe führen soll.

Durch den Quellvorgang entsteht in der Bitumenmatrix ein Gel aus Elastomeren, Asphaltenen und Maltene 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.

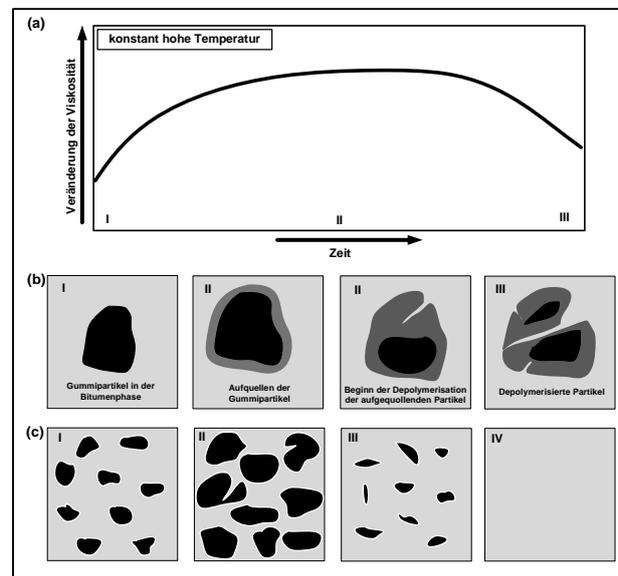


Bild 2: Verlauf der Bitumen-Gummi-Interaktion bei hohen Temperaturen: (a) Veränderung der Viskosität, (b) Veränderung der Partikelgröße und (c) Veränderung der Bitumenmatrix in Anlehnung an [ABDELRAHMAN, 2006]

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.

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

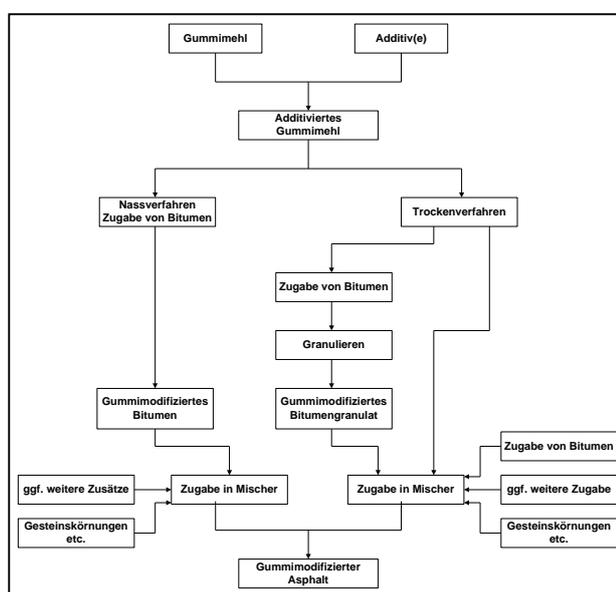


Bild 3: Begriffe bei der Modifizierung von Bitumen und Asphalt mit Gummimehl bzw. -granulat [E GmBA, 2012]

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.

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

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 Gummimehlanteile 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.

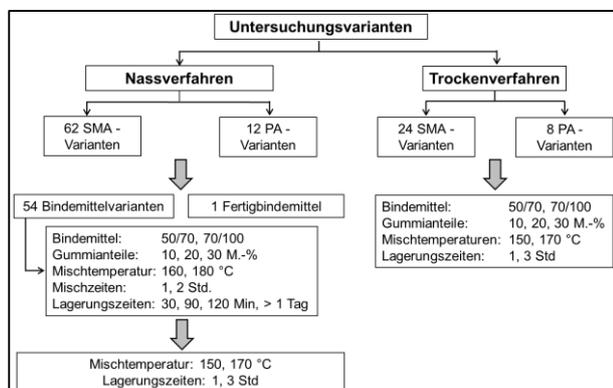


Bild 4: Untersuchungsvarianten

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.

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
- 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 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.

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]

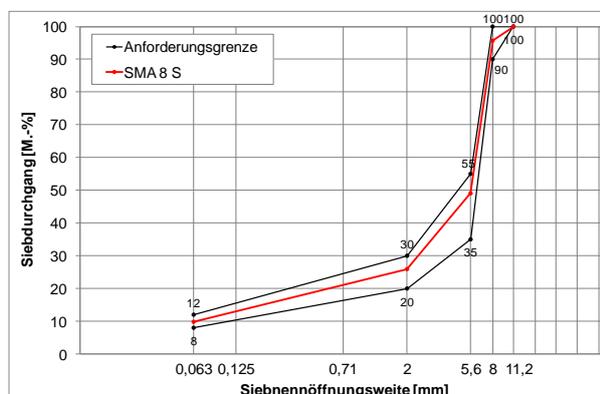


Bild 5: Korngrößenverteilung des hergestellten SMA 8 S inklusive der Anforderungsgrenzen gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

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/cm ³]	2,834	

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

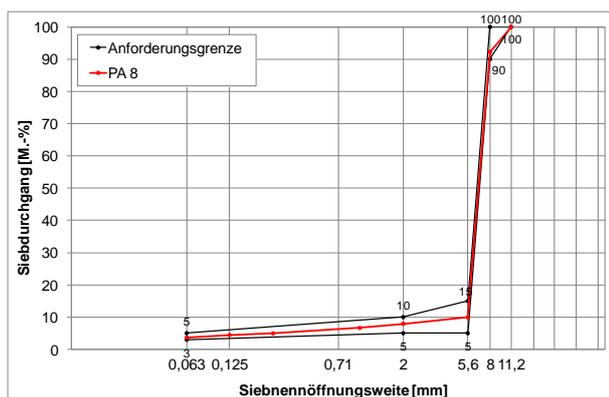


Bild 6: Korngrößenverteilung des hergestellten PA 8 inklusive der Anforderungsgrenzen gemäß [TL Asphalt-StB, 2007]

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 die Tabelle 5 für den PA 8 geben einen detaillierten Überblick über die Bindemittel- und Gummimehlanteile im Asphaltmischgut.

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

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 Asphaltes 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.

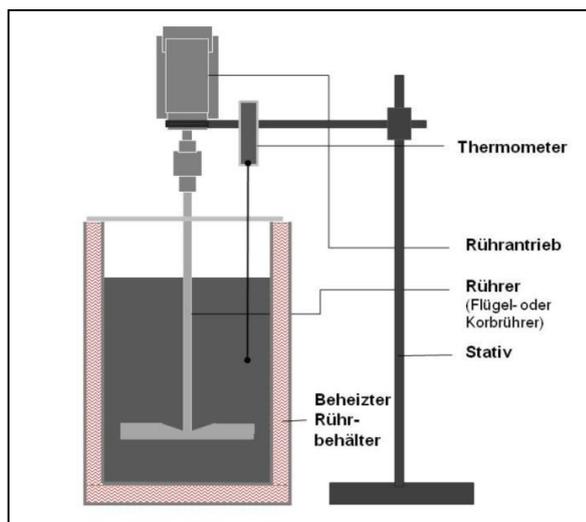


Bild 7: Geräteskizze zur Herstellung von Gummimodifizierten Bitumen aus Straßenbaubitumen und Gummimehl [E GmBA, 2012]

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 Asphaltes.

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:

- 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.

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

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 Abzugschrank 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 Gummimodifizierte 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 separieren. 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

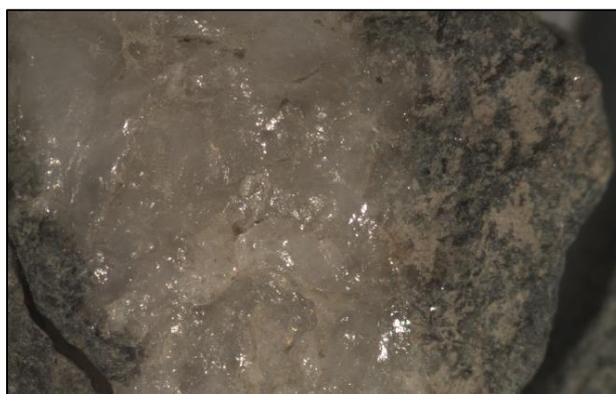


Bild 11: Mikroskopaufnahme eines Gesteinskorns mit Sandrückständen

Veraschung

Um einen hinreichend genauen Bindemittelgehalt von Gummimodifizierten Asphalten unabhängig von der herkömmlichen Extraktion mit dem Lösemittel Trichlorethylen und den damit verbundenen einzuhaltenen Arbeitssicherheitsbestimmungen ermitteln zu können, wurde in einem separaten Schritt die Methode der Veraschung herangezogen. Bei der Veraschung wird das Material durch thermische Beanspruchung mit Hilfe 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 den Kapiteln 5.2.3 und Kapitel 5.3.2 beschrieben.



Bild 12: Muffelofen zur Veraschung

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.

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 folgende in Tabelle 8 aufgeführte Kenndaten an dem Asphaltmischgut, an dem extrahierten Bindemittel und an dem Gesteinskörnungsgemisch ermittelt.

Kenndaten	Vorschrift/Norm
Asphaltrohddichte	[TP Asphalt-StB, Teil 5, 2007]
Raumddichte	[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 an dem 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 offenporigen Asphalten PA 8, Splittmastixasphalten SMA 11 S und Asphaltbinder AC 16 B S betrachtet. 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.

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

Tab 9: Erst- und Kontrollprüfung an PA 8

Baumaßnahme	Erstprüfung		Kontrollprüfung / Eigenüberwachung			Abweichung [M.-%]
	Binde-mittel-gehalt [M.-%]		Binde-mittel-gehalt [M.-%] 6 Proben	Mittel		
1	Binde-mittel-gehalt [M.-%]	6,3	Binde-mittel-gehalt [M.-%] 6 Proben	Mittel	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.-%]
	Binde-mittel-gehalt [M.-%]		Binde-mittel-gehalt [M.-%] 5 Proben	Mittel		
1	Binde-mittel-gehalt [M.-%]	4,4	Binde-mittel-gehalt [M.-%] 5 Proben	Mittel	4,70	+0,30
				Min	4,4	
				Max	4,8	

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

5.2 Laborversuche zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes

5.2.1 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 Grundbitumen 50/70 und 70/100 mit Gummimehlanteilen von 10 M.-%, 20 M.-% und 30 M.-% verwendet. Die Mischtemperaturen bei der Herstellung der Gummimodifizierten 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 Gummimodifiziertes Bindemittel herangezogen. Im Weiteren wurden 24 Variationen SMA 8 S und acht Variationen an PA 8, die im Trockenverfahren hergestellt wurden, extrahiert und wiederum hin-

sichtlich des ungelösten Gummipartikelanteils analysiert. Die Mischtemperaturen bei der Asphaltherstellung betragen 150 °C, 170 °C und 190 °C und 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 wiedergefundene 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 Gummimodifizierten 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 Gummimodifizierten 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 Gummipartikelanteile in [M.-%] dargestellt. Die Annäherungsformel in Abhängigkeit von der Bitumenhärte, des zugegebenen Gummimehlanteiles und den Herstellungseinflüssen aus Mischtemperatur und Lagerungszeit ergibt sich zu:

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

Anhand dieser Formel lässt sich eine Tendenz dahingehend erkennen, dass der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] sowohl mit weicherem Bindemittel (NP) als auch mit steigender Mischtemperatur (MTA) und Lagerungszeit des Asphalttes (LZA) sinkt, im Umkehrschluss sich vermutlich mehr Gummimehl im Bitumen löst.

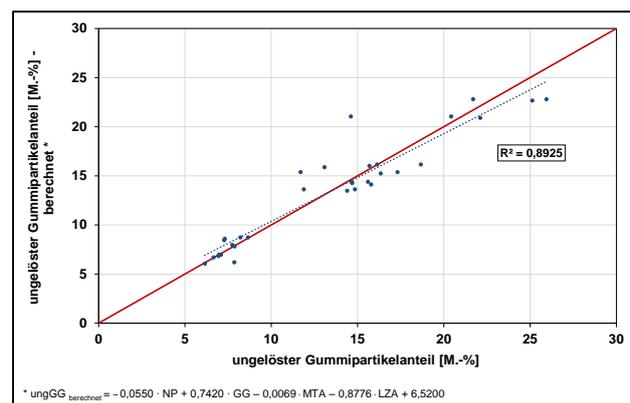


Bild 13: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Trockenverfahren komplett

In Bild 14 bis 16 sind alle ermittelten ungelösten Gummipartikelanteile in [M.-%] der im Nassverfahren hergestellten Asphaltte 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:

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

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 Asphaltens sinkt. Die Lagerungszeit (LZB) des Bitumens geht mit einem minimalen Anteil in die Berechnung ein.

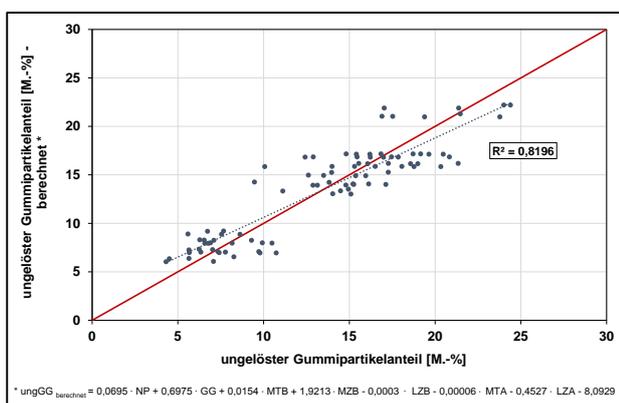


Bild 14: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren komplett

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

$$\text{ungG}_{N,1 \text{ berechnet}} = 0,0777 \cdot \text{NP} + 0,7023 \cdot \text{GG} + 0,0164 \cdot \text{MTB} + 2,1119 \cdot \text{MZB} - 0,0002 \cdot \text{LZB} - 9,9209$$

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

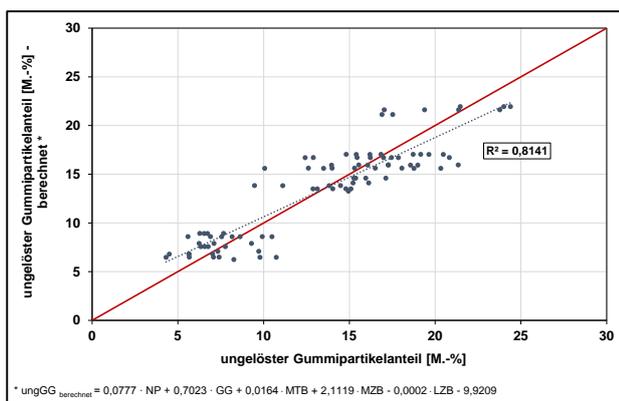


Bild 15: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren, Herstellungsbedingungen des Gummimodifizierten Bitumens

Bild 16 stellt die Einflüsse bei der Herstellung des Gummimodifizierten Asphaltens auf den ungelösten Gummipartikelanteil dar, während die Einflüsse bei

der Herstellung des Gummimodifizierten Bitumens in dieser Berechnung vernachlässigt werden:

$$\text{ungG}_{N,2 \text{ berechnet}} = 0,0312 \cdot \text{NP} + 0,7068 \cdot \text{GG} + 0,0011 \cdot \text{MTA} - 0,5998 \cdot \text{LZA} - 0,2986$$

Die Tendenz, die durch das Trockenverfahren ermittelt wurde, kann insofern bestätigt werden, dass der ungelöste Gummipartikelanteil in [M.-%] mit steigender Lagerungszeit (LZA) des Asphaltens sinkt, im Umkehrschluss sich anscheinend mehr Gummipartikel im Bitumen lösen. Die Mischtemperatur (MTA) des Asphaltens geht mit einem minimalen Anteil in die Berechnung ein.

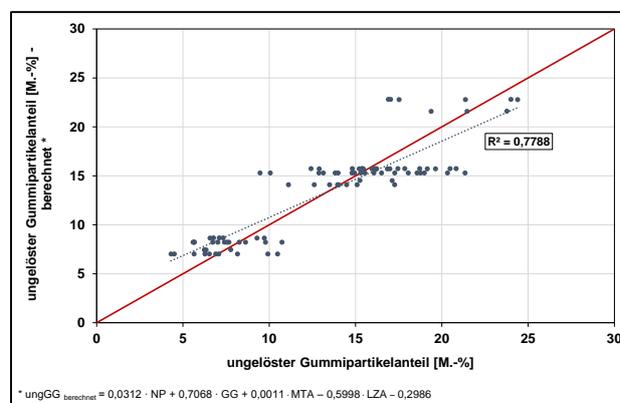


Bild 16: Regression – ungelöster Gummipartikelanteil – Nassverfahren, Herstellungsbedingungen des Gummimodifizierten Asphaltens

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

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 Mono-	8,5 - 13,6	12,9 - 17,5
Anteil Di- Aromaten	5,7 - 12,2	10,7 - 12,3
Anteil Poly-	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

Das 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.-%.

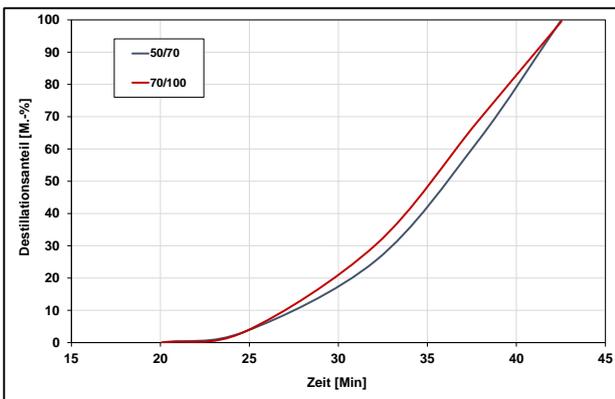


Bild 17: Siedeanalyse der Bitumensorten 50/70 und 70/100

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 Asphaltens 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 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 ungelöste 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.

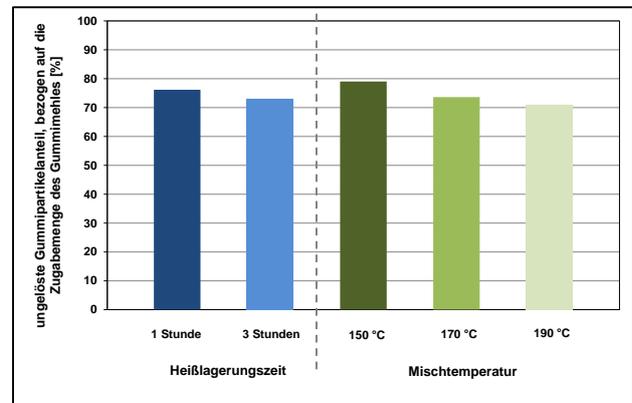


Bild 18: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)

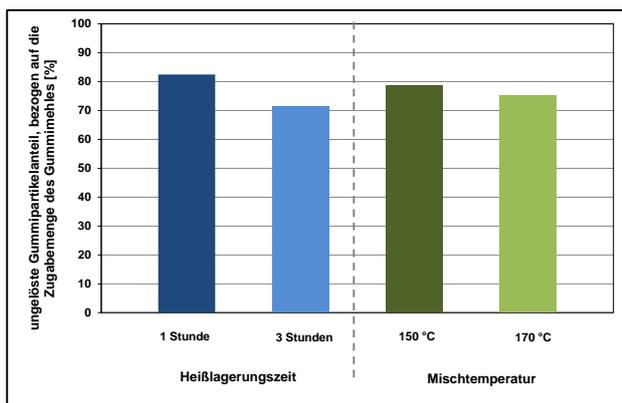


Bild 19: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)

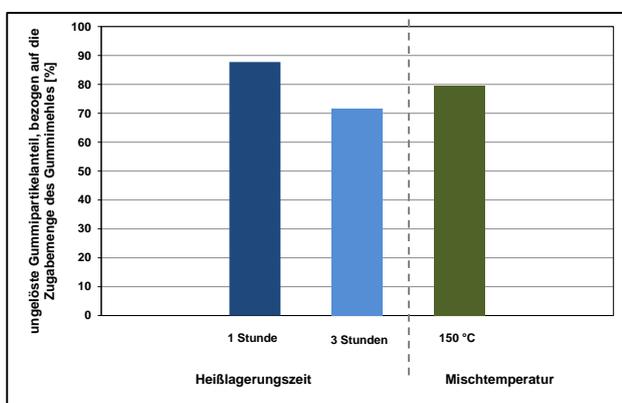


Bild 20: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)

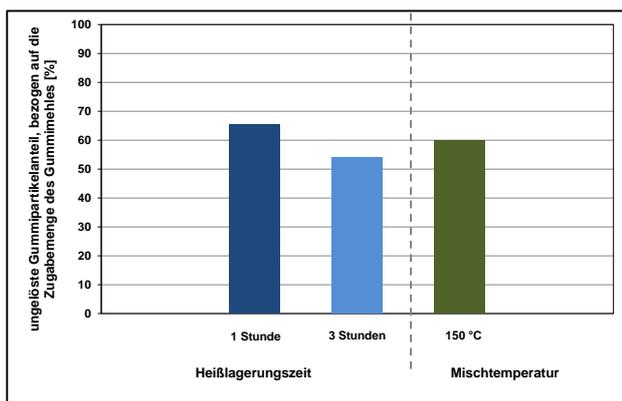


Bild 21: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Trockenverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)

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 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.

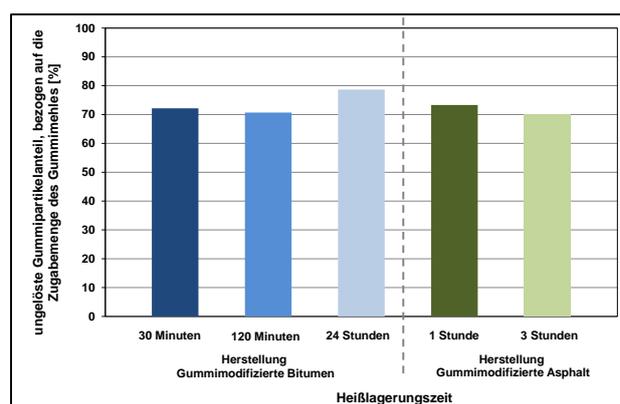


Bild 22: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)

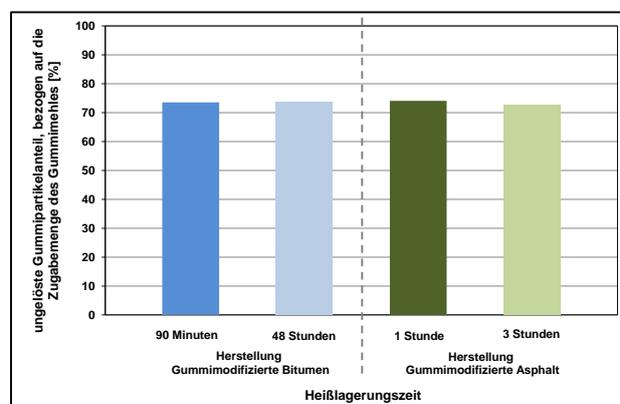


Bild 23: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Anhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)

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

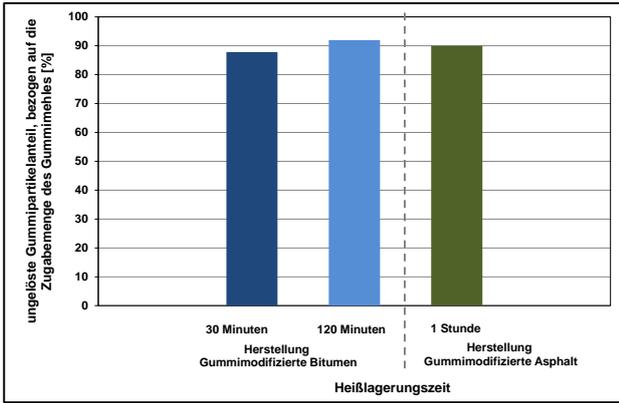


Bild 24: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)

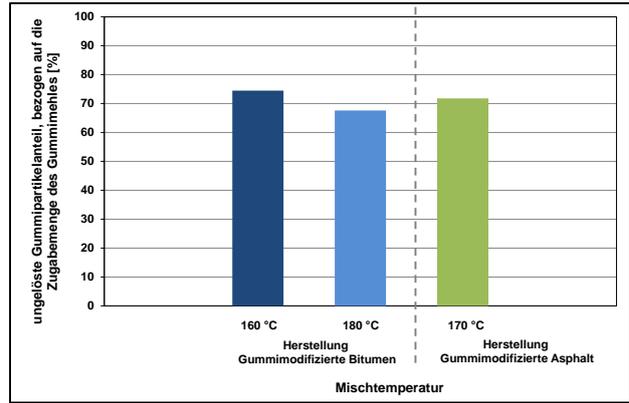


Bild 26: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 50/70)

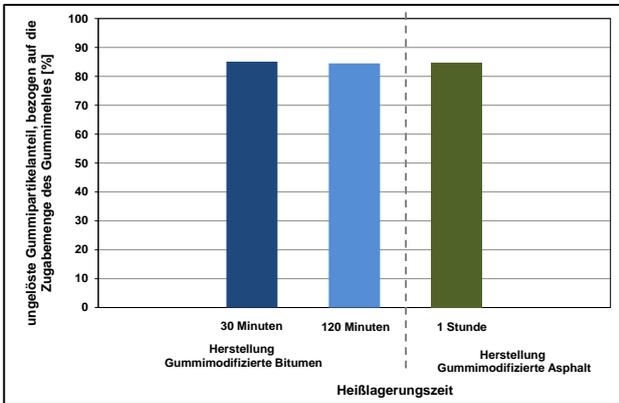


Bild 25: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)

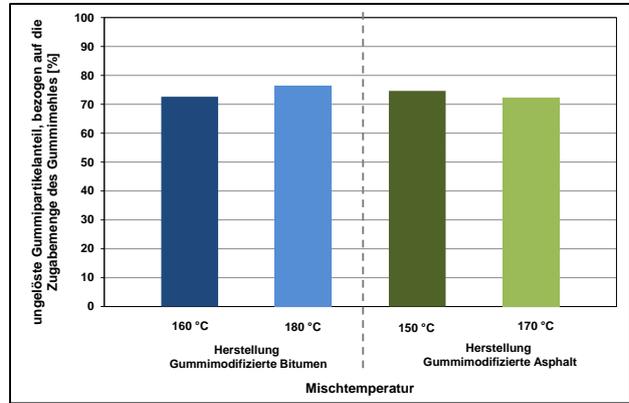


Bild 27: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit Grundbitumen 70/100)

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.

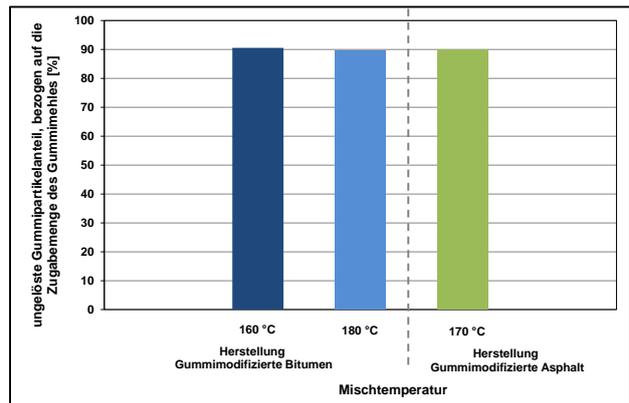


Bild 28: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 50/70)

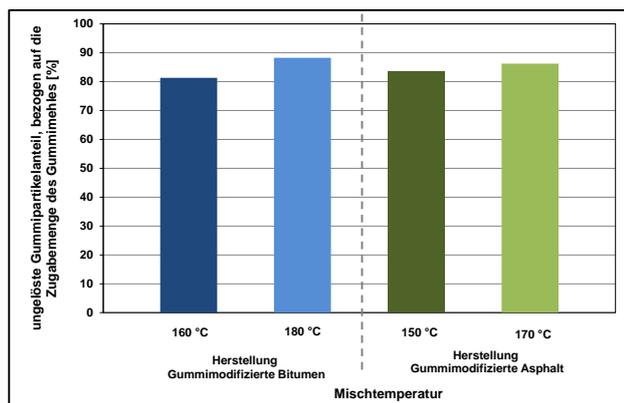


Bild 29: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit Grundbitumen 70/100)

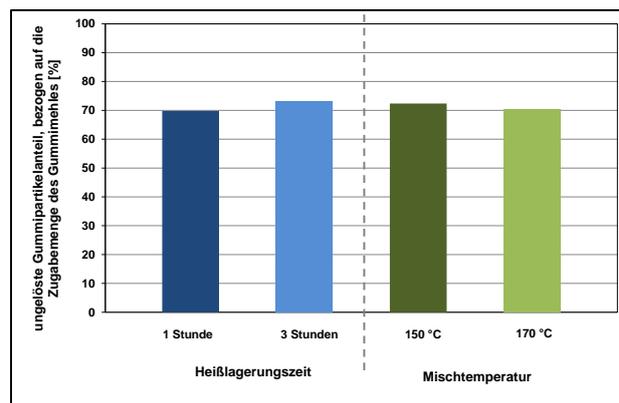


Bild 31: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Nassverfahren, PA 8 mit gebrauchsfertigem Gummimodifizierten Bindemittel)

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

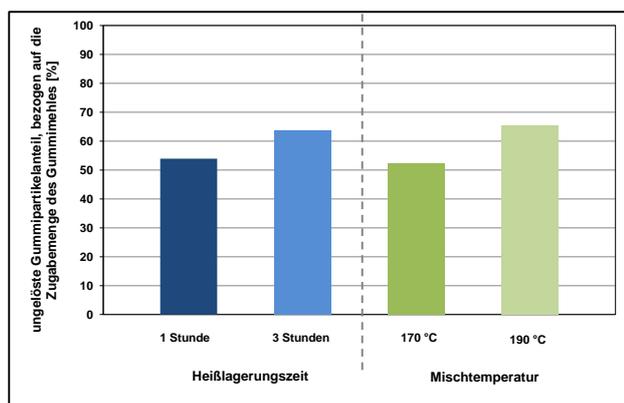


Bild 30: Ungelöster Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles in Abhängigkeit von der Heißlagerungszeit und der Mischtemperatur (Nassverfahren, SMA 8 S mit gebrauchsfertigem Gummimodifizierten Bindemittel)

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

Weiterhin wurden, um die Schwankungen bei der Ermittlung des ungelösten Gummipartikelanteiles 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).

Die 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			
	ungelöste 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

Das 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.

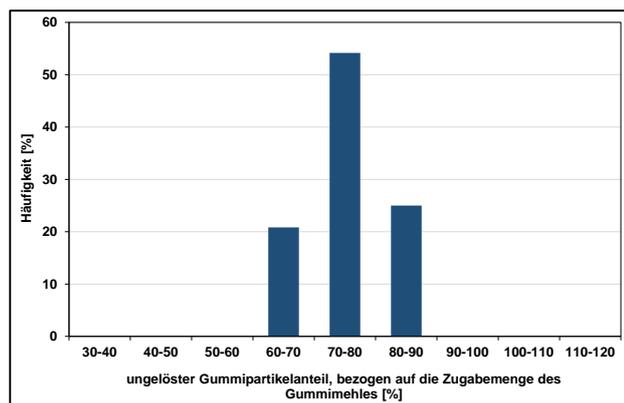


Bild 32: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Trockenverfahren SMA 8 S, N=24

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 zugegebenen Bindemittelgehalt von 6,5 M.-% erfüllen.

	Trockenverfahren PA 8		
	ungelöste 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

Das 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.

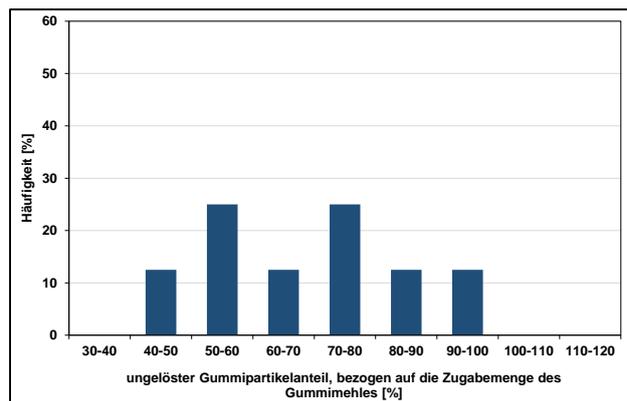


Bild 33: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Trockenverfahren PA 8, N=8

Die Tabellen 15 und 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). Die Bilder 34 und 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 100 % ausweisen. Dies weist daraufhin, dass sich in den ungelösten Gummipartikelanteilen Fülleranteile befinden. Die zusätzlich durchgeführten Mikroskopaufnahmen (Bild 39) belegen diese Vermutung.

	Nassverfahren SMA 8 S		
	ungelöste 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

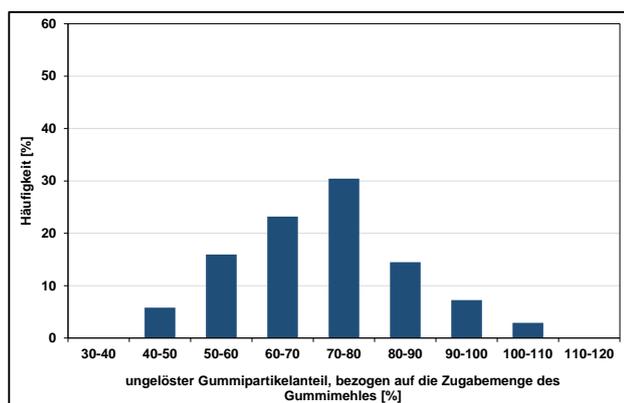


Bild 34: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nassverfahren SMA 8 S, N=69

	Nassverfahren PA 8		
	ungelöste 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

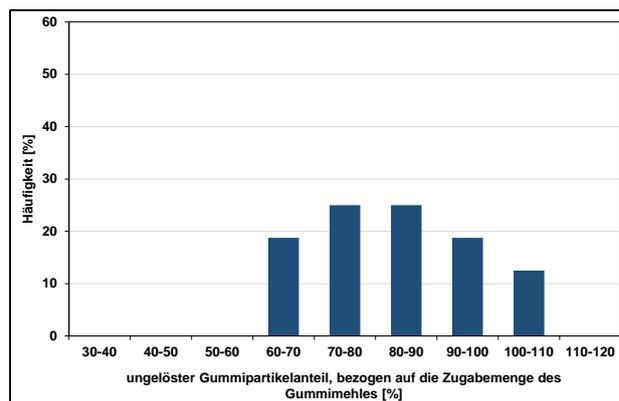


Bild 35: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nassverfahren PA 8, N=32

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 graphisch, wie häufig welche Gummipartikelanteile von 93 Extraktionen an SMA 8 S und 40 Extraktionen an PA 8 auftreten. Die Mittelwerte der ungelösten Gummipartikel liegen 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 Fülleranteile befinden, andererseits aber auch Gummipartikel in den Gesteinskörnungen. Bild 39 und Bild 40 zeigen Mikroskopaufnahmen, die dies belegen.

	Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S		
	ungelöste 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

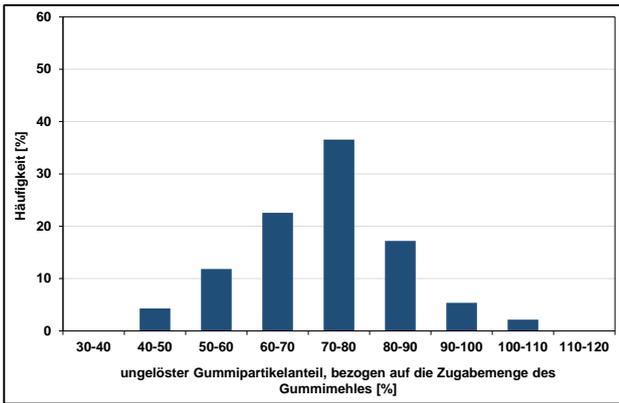


Bild 36: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S, N=93

	Nass- und Trockenverfahren PA 8		
	ungelöste 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

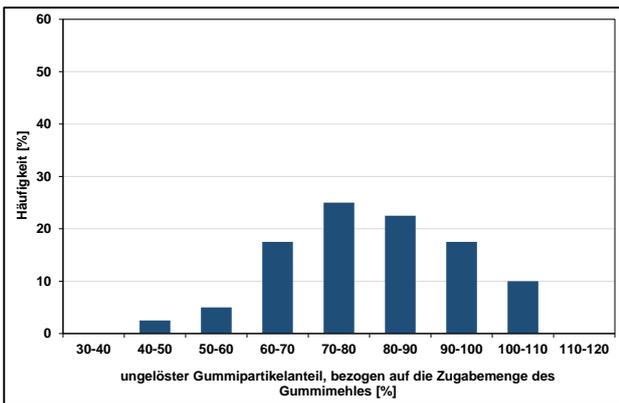


Bild 37: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren PA 8, N=40

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 PA 8 und SMA 8 S
	ungelöste 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

Das 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.

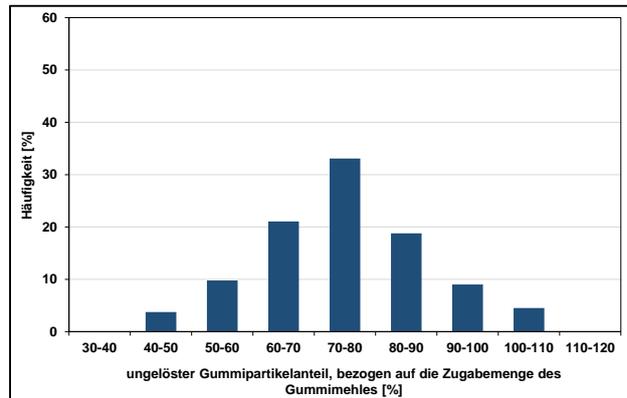


Bild 38: Häufigkeitsverteilung des ungelösten Gummipartikelanteils, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles – Nass- und Trockenverfahren SMA 8 S und PA 8, N=133

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 Gummimodifizierten 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 Gummipartikelanteiles 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 Gummimodifizierten Asphalt mit dem Lösemittel Trichlorethylen beschäftigen. In diesen Extraktionsanlagen wurden vergleichende Untersuchungen an Gummimodifizierten Asphalten (Nass- und Trockenverfahren) durchgeführt.

Bei der geschlossenen Extraktionsanlage des einen Herstellers wird das Gummimodifizierte 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).



Bild 41: Geschlossene Extraktionsanlage – Hersteller 1

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



Bild 42: Geschlossene Extraktionsanlage – Hersteller 2

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 Reifprozess 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 Bindemittelleigenschaften 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.

Das 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.

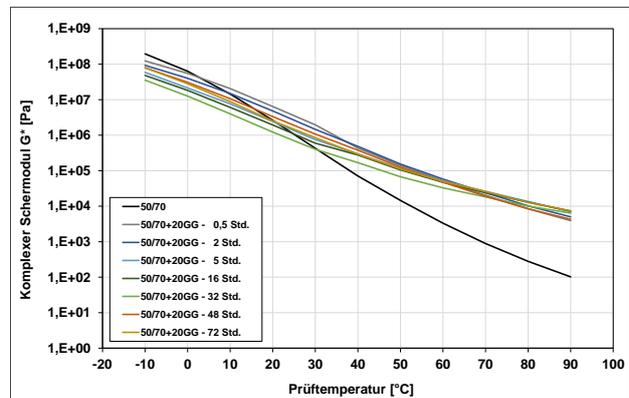


Bild 43: Komplexer Schermodul – Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C

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

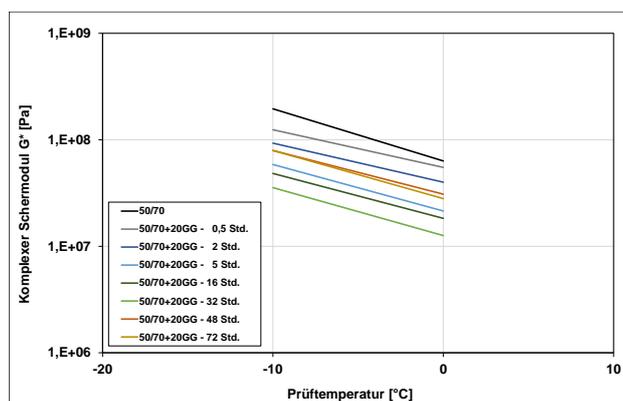


Bild 44: Komplexer Schermodul – Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Tieftemperaturbereich -10 °C bis 0 °C

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.

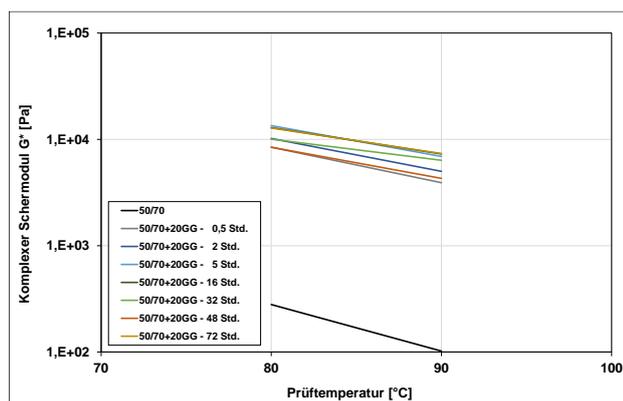


Bild 45: Komplexer Schermodul – Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Hochtemperaturbereich von 80 °C bis 90 °C

Das 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.

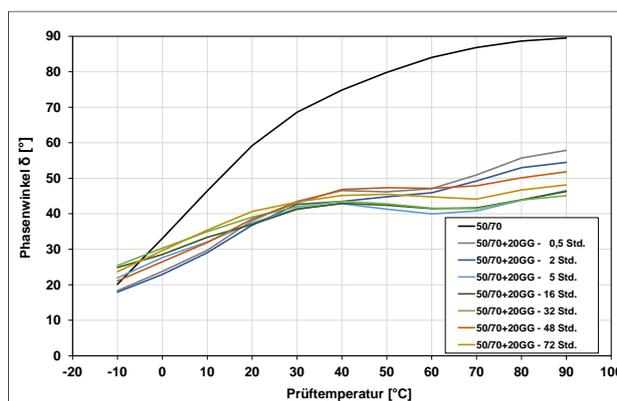


Bild 46: Phasenwinkel – Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C

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.

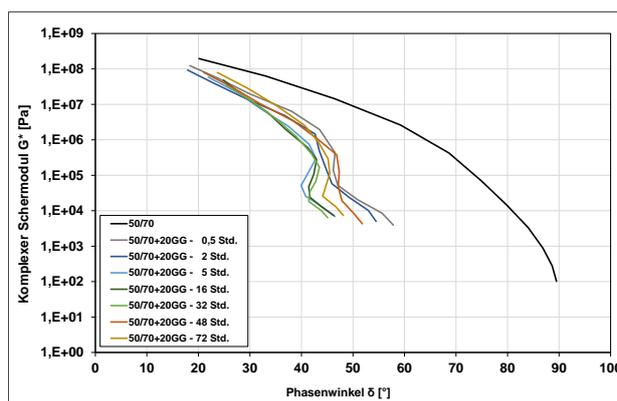


Bild 47: Black-Diagramm – Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 90 °C

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

löst. 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.

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

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.

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

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 Heißlagerungs-

zeit, durchgehend eine Verringerung der Nadelpenetration bei gleichzeitiger Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel.

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

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 Bindemittleigenschaften 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.

Das 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.

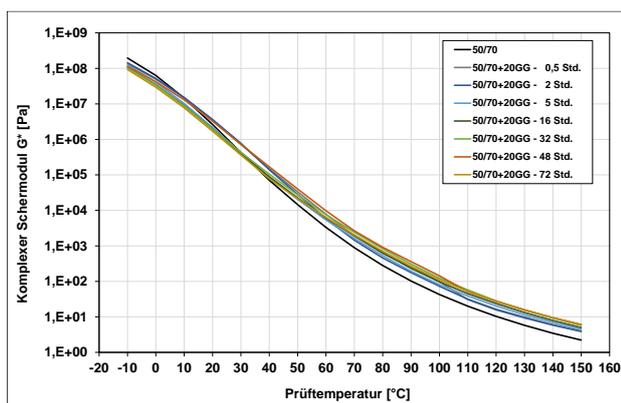


Bild 48: Komplexer Schermodul – extrahiertes Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C

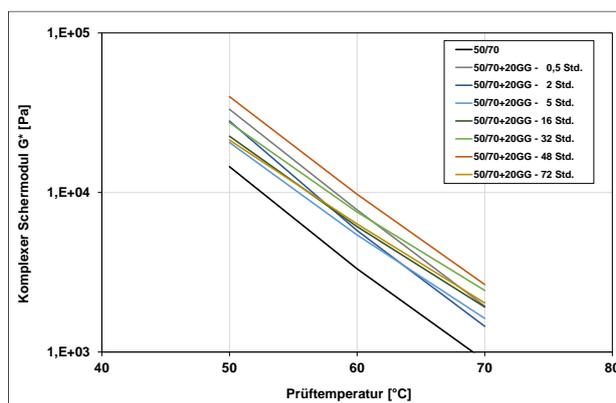


Bild 50: Komplexer Schermodul – extrahiertes Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Gebrauchstemperaturbereich 50 °C bis 70 °C

Zur besseren Veranschaulichung des Einflusses der Heißlagerungszeiten auf den komplexen Schermodul, sind 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 Gummimodifizierten 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.

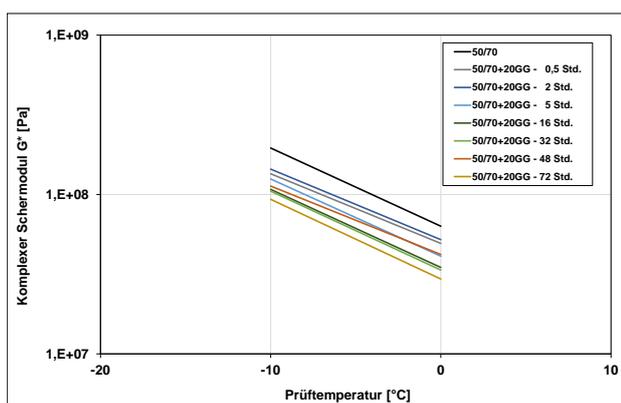


Bild 49: Komplexer Schermodul – extrahiertes Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Tieftemperaturbereich -10 °C bis 0 °C

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

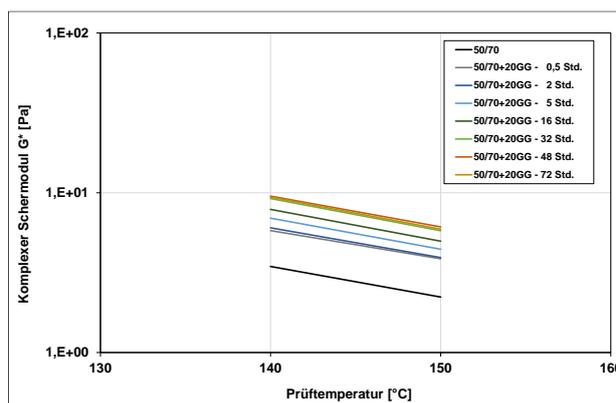


Bild 51: Komplexer Schermodul – extrahiertes Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Hochtemperaturbereich von 140 °C bis 150 °C

Das Bild 52 zeigt den Verlauf des Phasenwinkels über den gesamten geprüften Temperaturverlauf. Entsprechend 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 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.

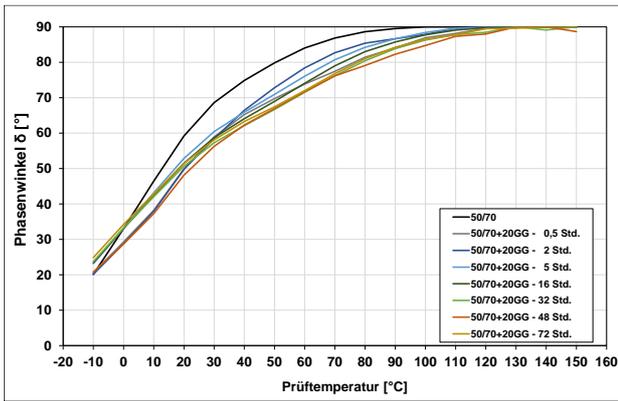


Bild 52: Phasenwinkel – extrahiertes Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C

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.

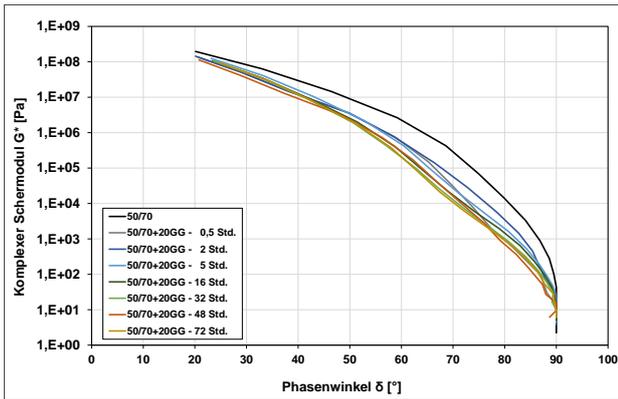


Bild 53: Black-Diagramm – extrahiertes Gummimodifiziertes Bitumen 50/70+20GG über den Temperaturbereich -10 °C bis 150 °C

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 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 mit Hilfe 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 1000 °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
1000	30	60	8,4	7,9	86,9
1000	75	135	8,1	7,9	86,9

Tab. 23: Veraschung der Ausgangsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen

Das Bild 54 veranschaulicht graphisch diesen Veraschungsprozess. Nach 60 Minuten, zu Beginn bei einer Temperatur von 800 °C und anschließend bei 1000 °C, sind die thermisch bedingten Gewichtsverluste abgeschlossen. Somit wurde für das weitere Vorgehen als optimale Veraschungszeit 75 Minuten bei einer Temperatur von 1000 °C festgelegt.

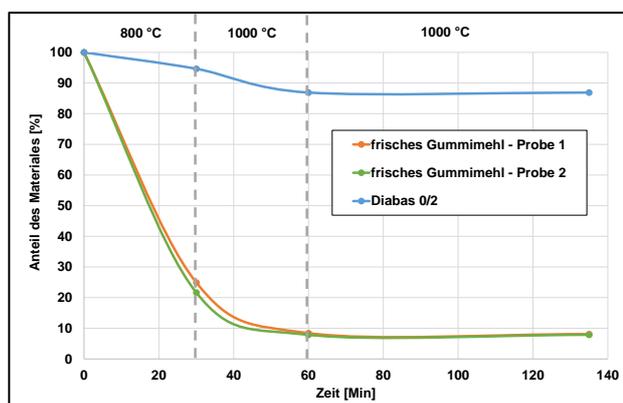


Bild 54: Veraschung der Ausgangsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen

Im nächsten Schritt wurden die weiteren verwendeten Gesteine, als Füller ein Kalkstein, als feine und grobe Gesteinskörnung Diabas, für 75 Minuten und 1000 °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 %.

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 1000°C

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 1000 °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 Gummimehl 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.

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 1000°C

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:

Erstprüfung:

1. Veraschung der verwendeten Ausgangsmaterialien (Gesteinskörnung und Gummimehl) für 75 Minuten bei 1000 °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 1000 °C und Angabe des verbleibenden Anteiles zu Vergleichszwecken

Kontrollprüfung:

5. Einsicht in die Angaben der Erstprüfung
6. Veraschung des Asphaltes für 75 Minuten bei 1000 °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 Heißsilierungszeit. Alle geprüften Asphalte wurden im Trockenverfahren modifiziert.

Die Tabelle 27 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, so dass sich ein Gesamtbindemittelgehalt von 7,9 M.-% nach der 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.

Nr.	Mischgutsorte	Modifizierungsverfahren	Grundbitumen	Gummimehlanteil	Bindemittelgehalt gemäß Erstprüfung	Ungelöste Gummipartikelanteil nach der Extraktion gemäß Erstprüfung	Lösliche Bindemittelgehalt nach der Extraktion gemäß Erstprüfung	Unlösliche Bindemittelgehalt nach der Extraktion gemäß Erstprüfung
				[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[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. 27: Erstprüfungswerte - begleitete Baumaßnahmen, Teil 1

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 28 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, so dass 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.

Baumaßnahme	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.-%]	ungelöste Gummipartikelanteil [M.-%]	ungelöste 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. 28: Durchgeführte Extraktionen - begleitete Baumaßnahmen, Teil 1

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 29 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.

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. 29: Mischgutentnahme - AC 16 B S

Der Einbau der Asphaltbinderschicht ist in folgendem Bild 55 exemplarisch dokumentiert.

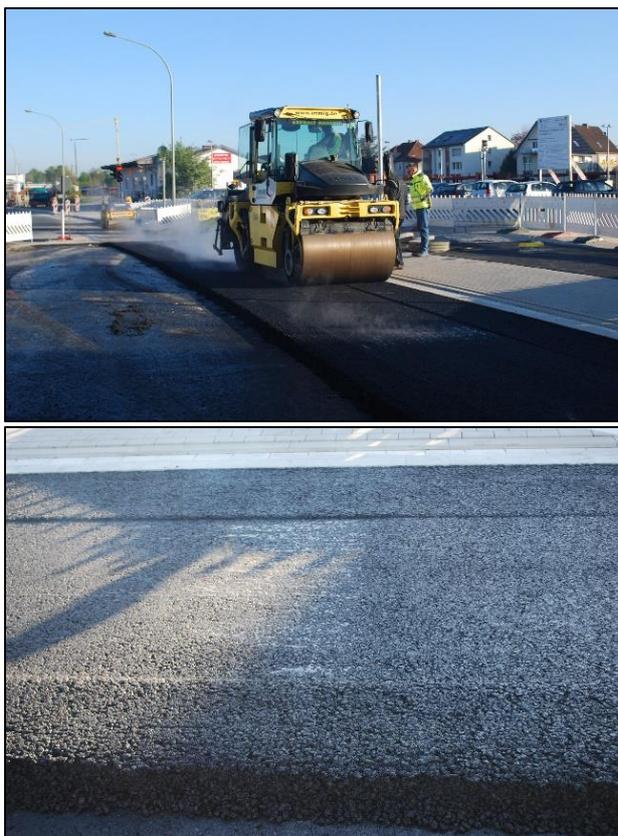


Bild 55: Einbaubilder AC 16 B S

Die Asphaltzusammensetzung und die Eigenschaften des AC 16 B S sind in der Erstprüfung (Tabelle 30) zusammengefasst.

Im Rahmen der Baubegleitung wurde eine Kontrollprüfung durchgeführt und die in Tabelle 31 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. Zusätzlich 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 der Tabelle 32 zu entnehmen. Die Besonderheit dieser Asphaltbinderschicht ist, dass sowohl 15,0 M.-% Asphaltgranulat als auch Faserstoffe eingesetzt wurden.

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		
Raumdichte MPK	[g/cm³]	2,447
Rohdichte der Asphaltprobe	[g/cm³]	2,536
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	3,5

Tab. 30: Erstprüfung AC 16 B S

Asphaltkonzept		AC 5 D S LA		
		Misch-anlage LKW 1	Bau-stelle LKW 1	Bau-stelle 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 32		
Gummimehl	[M.-%]			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	[°C]	66,0	65,9	70,5
Nadelpenetration	[0,1mm]	26,8	22,3	21,8
Mischguteigenschaften				
Raumdichte MPK	[g/cm³]	2,463	2,459	2,465
Rohdichte der Asphaltprobe	[g/cm³]	2,533	2,521	2,530
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	2,8	2,5	2,6

Tab. 31: Kontrollprüfung AC 16 B S

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. 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 grundlegender 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.

Proben	Binde- mittel	Gummi- mehl- anteil [M.-%]	Asphalt	Binde- mittel- gehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zu- schlag unlös- lich	Binde- mittel- gehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Binde- mittel- gehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zu- schlag unlös- lich	Binde- mittel- gehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	unge- löste Gummi- partikel- anteil [M.-%]	ungelöste Gummi- partikelanteil, bezogen auf die Zugabe- menge des Gummi- mehles [%]
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. 32: Durchgeführte Extraktionen – AC 16 B S

Das Bild 56 veranschaulicht die wiedergefundenen ungelösten vernetzten Gummipartikel, an denen sich zusätzlich Fülleranteile und Faserstoffe ange- lagert haben.



Bild 56: Faserstoffe in ungelösten Gummipartikeln

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 33 nach drei verschiedenen Zeitpunkten entnommen. Weiterhin sind in Tabelle 33 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.

Entnahmeort	Lagerungszeit	Mischgut- temperatur
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. 33: Mischgutentnahme - AC 5 D S LA

Der Einbau der Asphaltdeckschicht ist in folgendem Bild 57 exemplarisch dokumentiert.

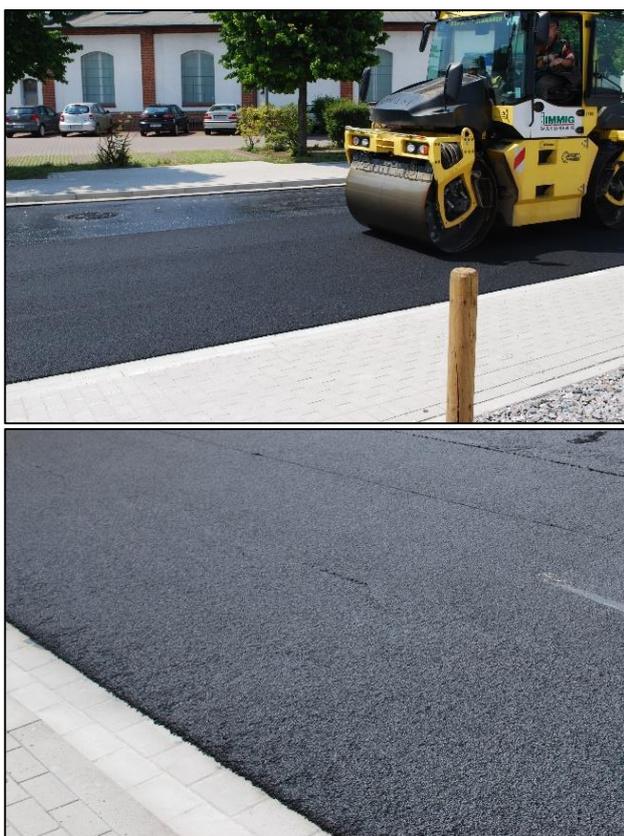


Bild 57: Einbaubilder AC 5 D S LA

Die Asphaltzusammensetzung und die Eigenschaften des AC 5 D S LA sind in der Erstprüfung (Tabelle 34) zusammengefasst.

Im Rahmen der Baubegleitung wurde eine Kontrollprüfung durchgeführt, um die in Tabelle 36 aufgeführten Asphaltkennwerte zu bestimmen.

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 35 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.

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		
Raumdichte MPK	[g/cm ³]	2,365
Rohdichte der Asphaltprobe	[g/cm ³]	2,425
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	2,5

Tab. 34: Erstprüfung AC 5 D S LA

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.

Proben	Bindemittel	Asphalt	Bindemittelgehalt löslich ohne Gummi	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt ohne Gummi	Bindemittelgehalt löslich mit Gummi	Zuschlag unlöslich	Bindemittelgehalt gesamt mit Gummi	unge löste Gummipartikelanteil	ungelöste Gummipartikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehles
			[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
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. 35: Durchgeführte Extraktionen – AC 5 D S LA

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 35		
Gummimehl	[M.-%]	* siehe Tabelle 35		
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. 36: Kontrollprüfung AC 5 D S LA

Aufgrund weiterhin bestehender prüftechnischer Schwierigkeiten hinsichtlich der Bindemittelgehaltsbestimmung nach den [E GmBA, 2012], insbesondere hinsichtlich der Arbeitssicherheit, wurde die 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 1000 °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 1000 °C im Muffelofen. Wie beschrieben wurde Asphaltmischgut nach drei unterschiedlichen Zeitpunkten entnommen, so dass drei Veraschungen durchgeführt wurden. Die verbleibenden Anteile der Asphalte nach der Veraschung sind der Tabelle 37 zu entnehmen. Diese liegen bei allen drei Asphalten bei ca. 82,5 %.

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

Tabelle 38 gibt die Zugabeanteile der Gesteinskörnung und den Bindemittelgehalt der Erstprüfung auf 100 M.-% wieder. Nachfolgend sind in der Ta-

belle 38 die Anteile der einzelnen Ausgangsmaterialien 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.

	Zugabemengen laut Erstprüfung		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. 38: Veraschung der Einzelkomponenten des Asphaltes – AC 5 D S LA

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 Gundbitumens und des Gummimehlanteils. Zusätzlich differierten die Bedingungen der Gummimodifizierung, so dass 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 ungelöste 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 Recyclen von Altreifen entstehen zwangsläufig unterschiedliche Zusammensetzungen. Ebenso werden verschie-

dene 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 Füllerteile 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.

7 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 Biegekriechsteifigkeit - Biegebalkenrheometer (BBR), Beuth Verlag, Berlin, 2005

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

FGSV: Einsatz von Gummi in Bitumen - Offene Fragen“, Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen, FGSV, Straße und Autobahn, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2. 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

Schinking, 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 Polymermodifizierte 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

G. B. 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

Anhang

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

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

Proben	Herstellung Gummimodifizierter Asphalt im Trockenverfahren				Bindemittel- gehalt löslich ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel- gehalt gesamt ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel- gehalt löslich mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel- gehalt gesamt mit Gummi [M.-%]	unge löste Gummi- partikelanteil [M.-%]	unge löste 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	0,15	6,7	11,7	58,5
2	70/100	20	PA 8	150	3	5,6	0,15	5,8	6,4	0,15	6,6	11,9	59,4
3	70/100	30	PA 8	150	1	5,1	0,16	5,2	6,5	0,16	6,7	21,7	72,3
4	70/100	30	PA 8	150	3	5,3	0,13	5,5	6,3	0,13	6,4	14,6	48,7
5	50/70	10	PA 8	150	1	6,1	0,15	6,2	6,6	0,15	6,8	8,2	82,1
6	50/70	10	PA 8	150	3	5,8	0,16	6,0	6,3	0,16	6,4	7,0	69,7
7	50/70	20	PA 8	150	1	5,2	0,16	5,3	6,4	0,16	6,5	18,7	93,3
8	50/70	20	PA 8	150	3	5,7	0,15	5,8	6,6	0,15	6,8	14,7	73,3

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

Folien	Herstellung Gummi-modifiziertes Bitumen (GmB)					Herstellung Gummi-modifizierter Asphalt			Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt ohne Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt mit Gummi [M.-%]	Zuschlag unlöslich	Bindemittel-gehalt mit Gummi [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil [M.-%]	ungelöste Gummi-partikelanteil, bezogen auf die Zugabemenge des Gummimehls [%]
	Bindemittel	Gummimehl-anteil [M.-%]	Misch-temperatur [°C]	Mischzeit [h]	Lagerungs-zeit [Min]	Asphalt	Misch-temperatur [°C]	Lagerungs-zeit [h]								
1	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,5	0,2	6,8	0,2	7,0	7,3	7,0	70,2
2	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	1	6,4	0,2	6,7	0,2	6,8	7,1	5,6	56,5
3	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	1	6,4	0,2	6,6	0,2	6,6	7,2	7,7	76,6
4	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,2	0,2	6,5	0,2	6,7	6,9	6,7	67,3
5	50/70	20	180	1	30	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,1	0,2	6,9	7,2	9,5	47,3
6	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,1	0,2	6,9	7,1	13,8	69,1
7	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,1	0,2	7,1	7,4	17,3	86,4
8	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	1	5,6	0,3	5,8	0,3	6,9	7,2	19,0	94,9
9	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	3	6,1	0,2	6,3	0,2	6,5	6,7	5,6	56,4
10	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	3	6,0	0,2	6,3	0,2	6,3	6,6	4,5	46,0
11	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,2	0,2	6,4	0,2	6,6	6,9	6,3	62,7
12	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	3	6,2	0,2	6,4	0,2	6,6	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	6,9	7,1	14,5	72,4
14	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	3	6,0	0,2	6,3	0,2	6,8	7,0	11,1	55,6
15	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	3	5,7	0,2	5,9	0,2	6,9	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	6,8	7,0	14,0	69,8
17	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,4	0,3	6,7	0,3	6,8	7,0	5,7	56,6
18	50/70	10	180	1	30	SMA 8 S	170	1	6,1	0,3	6,4	0,3	6,6	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	6,9	7,2	9,8	97,8
20	50/70	10	180	1	120	SMA 8 S	170	1	6,4	0,3	6,7	0,3	7,2	7,5	10,7	107,4
21	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	1	6,5	0,3	6,8	0,3	6,9	7,2	5,6	55,8
22	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,5	0,2	6,8	0,2	7,1	7,3	7,5	75,5
23	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,2	0,3	6,4	0,3	6,8	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	6,9	7,1	14,8	74,0
25	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	1	5,7	0,3	6,0	0,3	6,6	6,9	13,1	65,7
26	50/70	20	180	1	120	SMA 8 S	170	1	5,8	0,2	6,1	0,2	6,7	7,0	12,9	64,4
27	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	1	5,9	0,2	6,2	0,2	6,9	7,2	14,0	69,9
28	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	1	6,0	0,3	6,2	0,3	7,2	7,4	16,5	82,5
29	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	1	6,0	0,3	6,3	0,3	6,7	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	6,8	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	6,7	7,0	4,3	43,1
32	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,1	0,3	6,3	0,3	6,8	7,0	9,9	99,2
33	50/70	10	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,5	0,3	6,7	0,3	7,0	7,2	6,9	69,0
34	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	3	6,5	0,2	6,8	0,2	7,1	7,4	8,2	81,6
35	50/70	10	180	2	120	SMA 8 S	170	3	6,2	0,3	6,4	0,3	6,9	7,2	10,5	104,9
36	50/70	20	180	1	30	SMA 8 S	170	3	6,3	0,3	6,5	0,3	7,3	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	6,9	7,2	15,1	75,4
38	50/70	20	180	2	30	SMA 8 S	170	3	6,0	0,3	6,2	0,3	6,9	7,1	12,6	63,0
39	50/70	20	180	2	120	SMA 8 S	170	3	5,7	0,3	6,0	0,3	6,7	6,9	13,5	67,5
40	50/70	10	180	1	24 Std.	SMA 8 S	170	1	6,4	0,3	6,7	0,3	7,0	7,3	8,3	82,6
41	50/70	20	180	1	24 Std.	SMA 8 S	170	1	6,0	0,3	6,3	0,3	7,1	7,4	14,9	74,7

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

Proben	Herstellung Gummi-modifiziertes Bitumen (GmB)					Herstellung Gummi-modifizierter Asphalt mit GmB			Bindemittel-gehalt (gesamt ohne Gummi) [M.-%]	Zuschlag unflüchtig	Bindemittel-gehalt (gesamt ohne Gummi) [M.-%]	Zuschlag unflüchtig	Bindemittel-gehalt (gesamt mit Gummi) [M.-%]	Zuschlag unflüchtig	Bindemittel-gehalt (gesamt 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]	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	0,17	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	0,16	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	0,16	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	0,16	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	0,16	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	0,16	6,3	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	0,16	6,7	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	0,16	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	0,17	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	0,16	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	0,17	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	0,17	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	0,17	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	0,16	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	0,17	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	0,16	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	0,17	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	0,17	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	0,17	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	0,17	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	0,17	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	0,16	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	0,16	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	0,16	6,4	0,16	6,5	18,6	92,8
26	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	150	1	5,2	0,16	5,4	0,16	5,9	0,16	6,1	11,2	74,4
27	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	150	1	5,7	0,17	5,8	0,17	6,4	0,17	6,6	11,6	77,4
28	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	150	3	5,5	0,16	5,6	0,16	6,1	0,16	6,3	10,3	68,6
29	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	150	3	5,4	0,16	5,6	0,16	6,1	0,16	6,2	10,4	69,0
30	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	170	1	5,4	0,17	5,6	0,17	6,0	0,17	6,1	9,1	60,4
31	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	170	1	5,5	0,16	5,7	0,16	6,2	0,16	6,3	10,0	67,0
32	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	170	3	5,5	0,17	5,6	0,17	6,1	0,17	6,3	11,0	73,2
33	GmB ₁₀₀	15	x	x	x	PA 8	170	3	5,3	0,16	5,5	0,16	6,1	0,16	6,2	12,1	81,0

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