
Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 225

Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt

von

Thomas Wörner, Henrik Eickhoff, Thomas Patzak, Harald Hilbig

Technische Universität München, cbm - Centrum Baustoffe und
Materialprüfung, Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 225

bast 
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0311
Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt

Fachbetreuung:
Franz Bommert

Referat:
Asphaltbauweisen

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-887-4 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s225>

Bergisch Gladbach, September 2025

Kurzfassung

Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt

Dämpfe und Aerosole finden seit vielen Jahren in der Asphaltbranche Beachtung. Bereits im Jahr 1997 wurde der „Gesprächskreis Bitumen“ gegründet, der sich seither mit den Gesundheitsgefahren bei Arbeiten mit Bitumen beschäftigt. Die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) hat in den vergangenen Jahren an zahlreichen Baustellen den Einbau von Asphalt messtechnisch begleitet und die dabei entstehenden Dämpfe und Aerosole in über 4500 Fällen gemessen. Auf Basis dieser umfangreichen Messungen hat der Ausschuss für Gefahrenstoffe in seiner Sitzung am 19./20.11.2019 beschlossen, dass der Arbeitsplatzgrenzwert für Dämpfe und Aerosole bei der Heißverarbeitung von Bitumen entsprechend den MAK-Empfehlungen auf $1,5 \text{ mg/m}^3$ (Bitumenkondensat-Standard; BKS) festgelegt wird. Dieser Grenzwert wird allerdings für einen Zeitraum von zunächst 5 Jahren ausgesetzt.

Durch die Auswahl der Proben soll ein repräsentativer Querschnitt der in Deutschland eingesetzten Asphalte mit und ohne Ausbuaasphalt und Bitumen bzw. Polymermodifizierten Bitumen und sichergestellt werden. Zudem fanden zwei Zusätze Verwendung.

Die Auswertungen zu den untersuchten Untersuchungsvarianten zeigen auf, dass Asphaltart / -sorte, Bindemittelart bzw. -sorte (Grundbindemittel, Art und Menge der zugegebene Polymere, Viskositätsverändernde Zusätze) sowie der Bitumenhersteller sich auf die Emissionen auswirken können. Den stärksten Einfluss auf die Emissionen scheinen die Bitumenhersteller und Bindemittelart/-sorte zu haben. Aussagen der Bindemittelhersteller legen nahe, dass die Herstellung des Bitumens eine entscheidende Rolle spielt. Der Einfluss der Asphaltart/-sorte auf die Emissionen fällt kleiner aus als erwartet. Aufgrund der Untersuchungen zeigt sich, dass sich eine Erniedrigung bzw. Erhöhung des Bindemittelgehalts um $\pm 0,5 \text{ M.-%}$ nicht systematisch auf die Emissionen auswirkt. Die Variation der Temperatur führt zu deutlichen Veränderungen der Emissionen. Die Untersuchungen, die bei $140 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt wurden, zeigen eine Reduktion auf weniger als die Hälfte im Vergleich zu Untersuchungen bei $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Für die Temperaturen 140 und $120 \text{ }^\circ\text{C}$ lässt sich eine analoge Reduktion feststellen.

Die Variation des Asphaltgranulatgehaltes führt zu kleinen Veränderungen der Emissionen. Tendenziell scheinen die Emissionen mit zunehmendem Gehalt an Asphaltgranulat leicht abzunehmen. Da es sich bei Asphaltgranulat um ein wiederverwertetes Material handelt, das bereits heißverarbeitet wurde, und die Menge an Frischbitumen bei Einsatz von Asphaltgranulat reduziert ist, ist davon auszugehen, dass die hohen Emissionen hier in geringerem Maße auftreten.

Das hier für die Untersuchung von Asphalten im Labor entwickelte Verfahren kann dazu dienen, die verschiedenen Bitumen und bitumenhaltigen Bindemittel grundsätzlich hinsichtlich ihrer Emissionen einzuordnen. Es ist jedoch dringend geboten, die Laborergebnisse durch Messungen in situ zu untermauern.

Abstract

Influences on the concentration of vapours and aerosols when laying rolled asphalt

Vapours and aerosols have attracted attention in the asphalt industry for many years. As early as 1997, the "Bitumen Discussion Group" was founded, which has been dealing with the health hazards of working with bitumen ever since. In recent years, the German Employer's Liability Insurance Association for the Construction Industry (BG BAU) has monitored the installation of asphalt at numerous construction sites and measured the resulting vapours and aerosols in over 4,500 cases. Based on these extensive measurements, the Committee for Hazardous Substances decided in its meeting on 19/20 November 2019 that the occupational exposure limit value for vapours and aerosols during hot processing of bitumen will be set at 1.5 mg/m³ (bitumen condensate standard; BKS) in accordance with the MAK recommendations. However, this limit value is suspended for an initial period of 5 years.

The selection of the samples is intended to ensure a representative cross-section of the asphalts used in Germany with and without reclaimed asphalt and bitumen or polymer-modified bitumen. In addition, two additives were used.

The evaluations of the investigated test variants show that asphalt type/grade, binder type/grade (base binder, type and quantity of added polymers, viscosity-changing additives) as well as the bitumen manufacturer can have an effect on the emissions. Bitumen manufacturer and binder type/grade appear to have the strongest influence on emissions. Statements from binder manufacturers suggest that bitumen production plays a crucial role. The influence of asphalt type/grade on emissions is smaller than expected. The investigations show that a reduction or increase of the binder content by ± 0.5 wt.% does not systematically affect the emissions. The variation of the temperature leads to significant changes in the emissions. The investigations carried out at 140 °C show a reduction to less than half compared to investigations carried out at 160 °C. The emissions of the binder content are not systematically affected by the variation of the temperature. An analogous reduction can be observed for the temperatures 140 and 120 °C.

The variation of the asphalt granulate content leads to small changes in emissions. There seems to be a tendency for emissions to decrease slightly with increasing asphalt granulate content. Since asphalt granulate is a recycled material that has already been hot processed and the amount of fresh bitumen is reduced when asphalt granulate is used, it can be assumed that the high emissions occur to a lesser extent here.

The method developed here for testing asphalts in the laboratory can be used to classify the various bitumens and bituminous binders in terms of their emissions. However, it is urgently necessary to substantiate the laboratory results by measurements in situ.

Summary

Influences on the concentration of vapours and aerosols when laying rolled asphalt

1. Introduction and problem definition

Vapours and aerosols have attracted attention in the asphalt industry for many years. As early as 1997, the "Bitumen Discussion Group" was founded, which has been dealing with the health hazards of working with bitumen ever since. Following the REACH regulation, which came into force on 1 July 2007, bitumen producers have agreed on a maximum handling temperature of 200 °C for bitumen and 230 °C for industrial/oxidation bitumen. However, some of the handling temperatures of rolled asphalt are well below this value, while those of mastic asphalt are in the range of up to 230 °C. The current regulations are based on the specifications of the "Technical delivery conditions for asphalt mixes for the construction of traffic area pavements, edition 2007/version 2013" (TL Asphalt-StB 07/13) and the "Additional technical contract conditions and guidelines for the construction of asphalt traffic area pavements, edition 2007/version 2013" (ZTV Asphalt-StB 07/13).

In recent years, the German Employer's Liability Insurance Association for the Construction Industry (BG BAU) has monitored the paving of asphalt at numerous construction sites and measured the resulting vapours and aerosols in over 4,500 cases. It can be assumed that with additional technical measures, exposure can be reduced even further, especially for screed operators and paver operators. Possible technical measures include, for example, extraction systems on the paver, as they have been in use in France since 2012.

On the basis of these extensive measurements, the Committee for Hazardous Substances decided in its meeting on 19/20 November 2019 that the occupational exposure limit value for vapours and aerosols during hot processing of bitumen will be set at 1.5 mg/m³ (bitumen condensate standard; BKS) in accordance with the MAK recommendations. However, this limit value will be suspended for an initial period of 5 years, as the construction industry is not in a position, as things stand at present, to comply with this limit value ad hoc when laying asphalt.

The previous measurements of BG BAU were carried out in situ, i.e. during the execution of asphalt work. Scientific laboratory tests on the basis of which an assessment can be made are currently not available. The aim of the research project is to create a basis for assessing and evaluating the potential of the current technical possibilities on the building materials side for reducing vapours and aerosols during the hot processing of bitumen.

2. Investigation programme

The selection of samples is intended to ensure a representative cross-section of asphalts used in Germany (asphalt concretes for asphalt wearing courses, asphalt binder courses and asphalt base courses as well as stone mastic asphalts) with and without reclaimed asphalt and bitumen or polymer-modified bitumen (18 products). In addition, two additives (one isocyanate-based, one fatty amine-based) were used.

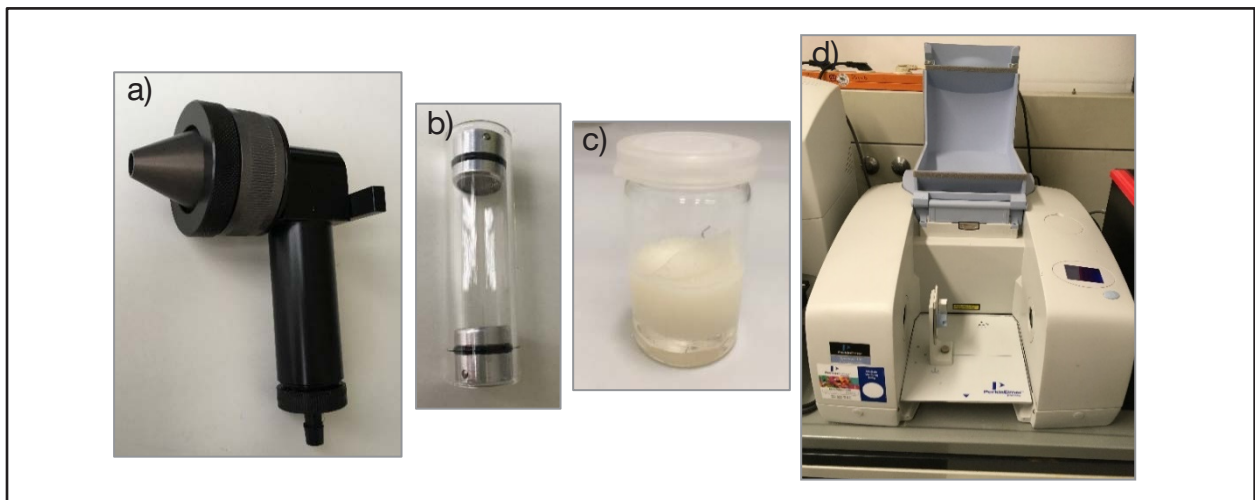
By using a laboratory mixer, it is possible to maintain different measuring temperatures between 120 and 160 °C over the entire measuring period. This ensures comparable framework conditions (e.g. temperature, mixer speed, mixing duration and mixing process) for all tests.

The test set-up to be selected and the analysis are basically based on the specifications of BGIA recommendation 6305/1 in order to create as many parallels as possible to the measurements during asphalt paving. It must be taken into account that in the laboratory tests, in which extraction takes place from a quasi-closed laboratory mixer, significantly higher concentrations of vapours and aerosols are to be expected than occur during asphalt paving under the influence of weather and wind. The transfer of the laboratory results to practice must be carried out as a follow-up to the research project.

3. Development of the test procedure

To determine the mass of aerosols and vapours released, a test system is to be developed that is based on existing procedures for sampling and analysis on construction sites. This is based on BGIA guideline 6305/1, which was supplemented by details from the IFA's "Measuring methods for the determination of cooling lubricants and other complex hydrocarbon mixtures in the air".

A total dust/gas sampling system (a), glass cartridges with sieve lids for inserting the XAD-2 adsorber (b), extraction vessels for adsorber and filter with tetrachloroethene (c) and an infrared spectrometer (d) for the final measurement were used to record the vapours and aerosols.



4. Investigations on asphalts

Results of Phase I: Variation of bitumen/bitumen combinations and asphalts

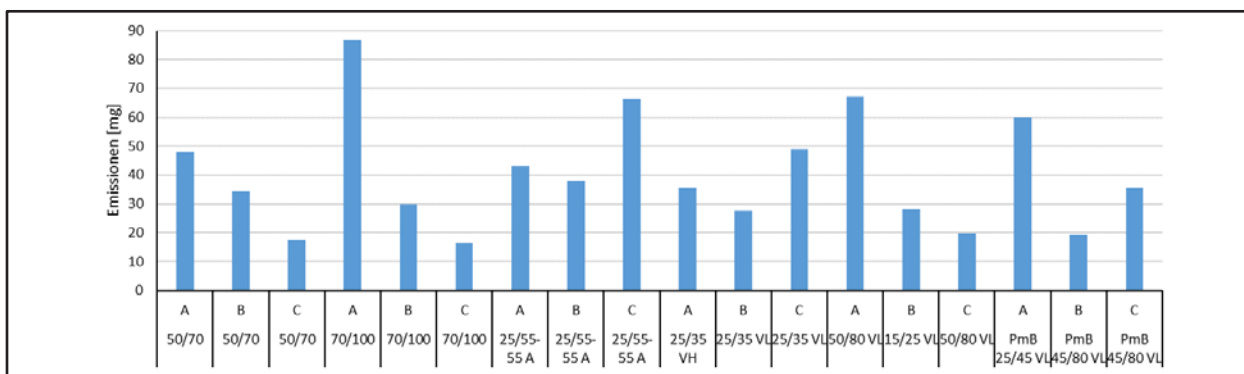
In phase I, the measured values of the emission were determined as a sum over the total duration of the mixing period of altogether 60 min at a constant asphalt mixture

temperature of 160 °C and sampling rate of 3.5 l/min. the tests were carried out at 160°C. The results of the tests were used for the determination of the emission. A total of 59 test variants were tested.

In the following table, the results are listed depending on the asphalt type; a direct assignment of the binders is not made here.

Asphaltart / -sort:	Minimal value [mg]	Maximum Value [mg]	Mean Value [mg]	Span [mg]
AC T	14,8	55,2	28,3	40,4
AC T RA	12,6	51,6	29,1	39,0
AC B	15,1	39,9	29,5	24,8
AC D	16,5	86,8	48,2	70,3
SMA	13,7	72,2	40,0	58,6

The influence of the various binders and their manufacturers is to be demonstrated using asphalt concrete for asphalt wearing courses as an example.



The evaluations of the examined study variants show that the following influencing factors can have an effect on the emissions:

- Asphaltart / -sort
- Binder

- Base binder
- Type and quantity of polymers added to the base binder
- Viscosity-changing additives added to the binder
- Bitumenhersteller

The strongest influence on emissions seems to be the bitumen producer and binder type/grade. Whether the large differences between the bitumen producers are due to the bitumen provenance or the production process cannot be clarified here. Statements from the binder producers suggest that the production of the bitumen plays a crucial role and can vary between different refineries even within the same producer. The significant differences in binder type/grade are probably partly due to certain types of added polymers in polymer modified bitumens (25/55-55 A or PmB 45/80 VL). The influence of asphalt type/grade on emissions is smaller than expected.

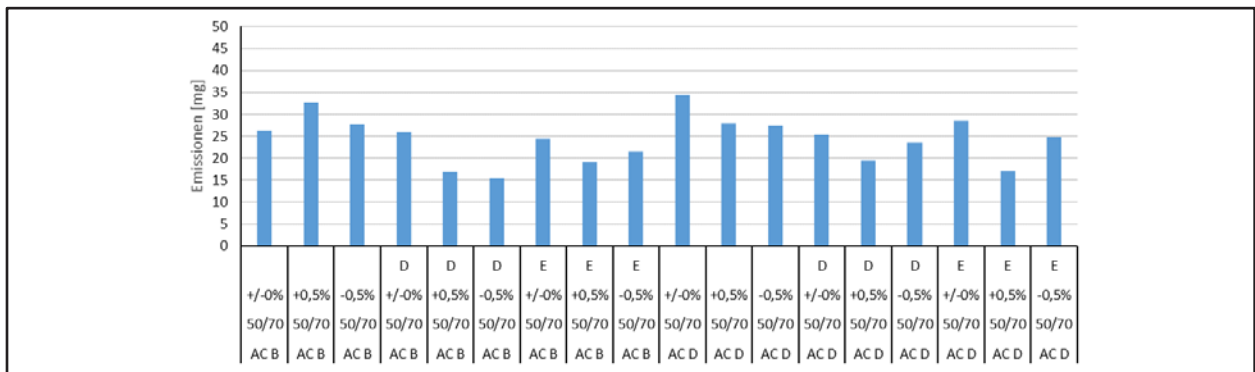
Results of Phase II: Variation of binder content and temperature

In investigation phase II, the influence of the temperature and the binder content on the emissions of different asphalt types / grades is investigated. For this purpose, in the test variants the temperature is lowered to 140 or 120 °C or the binder content is increased by +0.5 wt.-% or decreased by -0.5 wt.-% at 160 °C sampling temperature. The test set-up, the sampling time of 60 min and a volume flow of 3.5 l/min are identical to those in Phase I.

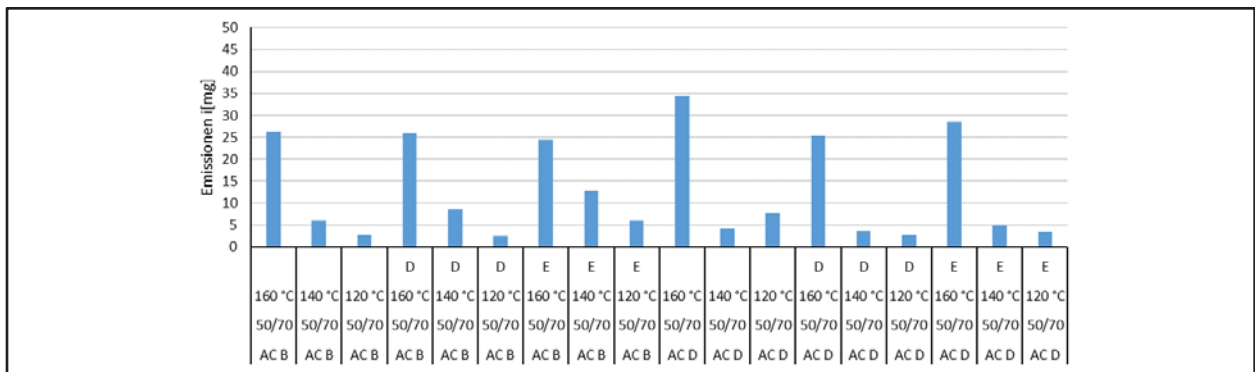
Based on the results from the preliminary tests and phase I, the tests in phase II are carried out on binders from manufacturer B, as these show the lowest scatter in repeat measurements.

The consideration of the influence of the asphalt granulate addition quantity and the additives is carried out in a joint consideration of the data from Phase I and Phase II.

The investigations show that a reduction or increase of the binder content by ± 0.5 wt.% does not systematically affect the emissions.



Tests were carried out at 140 °C and 120 °C and compared with the results of the measurements from phase I. The variation of the temperature leads to significant changes in the emissions. The tests conducted at 140 °C show a reduction to less than half compared to tests conducted at 160 °C. An analogous reduction can be observed for the temperatures 140 and 120 °C.



Tests were carried out without, with 40 wt.% and with 70 wt.% asphalt granulate. The variation of the asphalt granulate content leads to small changes in the emissions. There seems to be a tendency for emissions to decrease slightly with increasing asphalt granulate content. Since asphalt granulate is a recycled material that has already been hot processed and the amount of fresh bitumen is reduced

when asphalt granulate is used, it can be assumed that the high emissions occur to a lesser extent here.

5. Outlook

The method developed here for testing asphalts in the laboratory can be used to classify the various bitumens and bituminous binders in terms of their emissions. However, it is urgently necessary to substantiate the laboratory results by measurements in situ.

Inhalt

1.	Einleitung und Problemstellung	14
2.	Ziel des Vorhabens	19
3.	Untersuchungsprogramm	20
4.	Entwicklung des Prüfverfahrens	26
4.1	Bekannte Prüfverfahren	26
4.2	Vorversuche mit Rotationsverdampfer	27
4.3	Festlegung der Parameter für Hauptversuche	30
4.4	Thermogravimetrische Versuche	36
5.	Untersuchungen an Asphalten	38
5.1	Untersuchungsergebnisse der Phase I: Variation der Bitumen/Bitumen- kombinationen und Asphalte	38
5.1.1	Auswertung nach Asphaltarten	39
5.1.2	Auswertung nach eingesetzten Zugabebindemitteln	46
5.1.3	Zusammenfassung der Phase I	54
5.2	Untersuchungsergebnisse der Phase II: Variation des Bindemittelgehaltes und der Temperatur	55
5.2.1	Variation des Bindemittelgehaltes	57
5.2.2	Variation der Temperatur	60
5.2.3	Zusammenfassung der Phase II	64
5.3	Gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse aus Phase I und Phase II: Variation des Asphaltgranulatanteils und der Zusätze	64
5.3.1	Variation des Anteils an Asphaltgranulat	64
5.3.2	Variation von Zusätzen	67
5.3.3	Zusammenfassung der gemeinsamen Betrachtung der Phase I und Phase II	70

6. Ausblick	70
Literatur	71
Tabellen	73
Bilder	74
Anlage: Arbeitsanleitung	78

1. Einleitung und Problemstellung

Dämpfe und Aerosole finden seit vielen Jahren in der Asphaltbranche Beachtung. Bereits im Jahr 1997 wurde der „Gesprächskreis Bitumen“ gegründet, der sich seither mit den Gesundheitsgefahren bei Arbeiten mit Bitumen beschäftigt. Im Nachgang zu der seit dem 1. Juli 2007 geltenden REACH-Verordnung [1] haben sich die Bitumenhersteller auf eine maximale Handhabungstemperatur bei Bitumen von 200 °C und bei Industrie-/Oxidationsbitumen von 230 °C geeinigt. Die Verarbeitungstemperaturen von Walzasphalt liegen jedoch z.T. deutlich unterhalb dieses Wertes, die von Gussasphalt im Bereich bis zu 230 °C. Die derzeitige Vorschriftenlage ergibt sich aus den Festlegungen der „Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007/Fassung 2013“ (TL Asphalt-StB 07/13) [2] sowie der „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007/Fassung 2013“ (ZTV Asphalt-StB 07/13) [3]. Hierin sind die in nachfolgender Tab. 1-1 aufgeführten niedrigsten und höchsten Temperaturen des Asphaltmischgutes für Walzasphalt festgelegt, wobei die niedrigsten Temperaturen bei Anlieferung auf der Baustelle und die höchsten Temperaturen beim Verlassen des Asphaltmischwerkes gelten.

Art und Sorte des Bindemittels im Asphaltmischgut	Asphaltbeton (AC)	Splittmastix-asphalt (SMA)	Offenporiger Asphalt (PA)
30/45	155 bis 195		
50/70	140 bis 180	150 bis 190	
70/100	140 bis 180	140 bis 180	
160/220	130 bis 170		
40/100-65			140 - 170
10/40-65	160 bis 190		
25/55-55	150 bis 190	150 bis 190	
45/80-50	140 bis 180	140 bis 180	

Tab. 1-1: Niedrigste und höchste Temperatur des Asphaltmischgutes in °C (Auszug aus Tabelle 3 TL Asphalt-StB 07/13).

Basierend auf Messungen der Dämpfe und Aerosole wurde für Gussasphalte bereits in den ZTV Asphalt-StB 07 die Möglichkeit eröffnet, mit viskositätsverändernden Zusätzen zu arbeiten, um die Verarbeitungstemperatur herabzusetzen und damit die Beschäftigten stärker zu schützen. Während zu Beginn die Zusätze überwiegend im Asphaltmischwerk zugegeben wurden, hat sich mit der Zeit auch ein Markt für lieferfertige viskositätsveränderte Bitumen etabliert. Die erlaubten Zusätze sowohl für den Einsatz in Gussasphalt als auch für den Einsatz in Walzasphalt sind in der „Erfahrungssammlung über die Verwendung von Fertigprodukten und Zusätzen zur Temperaturabsenkung von Asphalt“ [4] zusammengestellt. Die erste Fassung der Erfahrungssammlung entstand auch auf Grundlage von Erprobungsstrecken, die im Rahmen von Forschungsarbeiten (u.a. [5]) erstellt und begleitet wurden. Gleichzeitig wurde auch das „Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt“ (M TA) [6] in den Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) erarbeitet, das seither bei Baumaßnahmen mit temperaturreduzierten Asphalten herangezogen wird. Ergänzend sind 2016 die „Empfehlungen zur Klassifikation von viskositätsveränderten Bindemitteln“ (E KvB) [7] erschienen.

Parallel zu diesen Aktivitäten hat die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) an zahlreichen Baustellen den Einbau von Asphalt messtechnisch begleitet und die dabei entstehenden Dämpfe und Aerosole in über 4500 Fällen gemessen. Das nachfolgende Bild gibt einen Eindruck über die Minderungspotentiale an Dämpfen und Aerosolen bei der Verarbeitung von Walzasphalt im Freien [8]. Die gesamten Messungen der BG BAU zeigen, dass Maximalwerte bis über 30 mg/m³ auftreten können. Es ist davon auszugehen, dass bei zusätzlichen technischen Maßnahmen die Exposition vor allem der Bohlenführer und Fertigerfahrer noch weiter reduziert werden kann. Als mögliche technische Maßnahme bieten sich Absaugeinrichtungen am Fertiger an, wie sie in Frankreich seit 2012 im Einsatz sind [10].

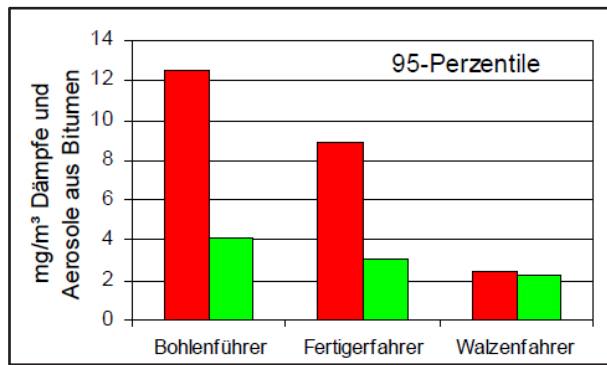


Bild 1-1: Dämpfe und Aerosole bei der Verarbeitung von konventionellem (rot) und temperaturabgesenktem (grün) Walzasphalt im Freien.

Auf Basis dieser umfangreichen Messungen hat der Ausschuss für Gefahrenstoffe in seiner Sitzung am 19./20.11.2019 beschlossen, dass der Arbeitsplatzgrenzwert für Dämpfe und Aerosole bei der Heißverarbeitung von Bitumen entsprechend den MAK-Empfehlungen auf $1,5 \text{ mg/m}^3$ (Bitumenkondensat-Standard; BKS) festgelegt wird. Dieser Grenzwert wird allerdings für einen Zeitraum von zunächst 5 Jahren ausgesetzt, da die Bauwirtschaft nach aktuellem Stand wie in Bild 1-1 dargestellt nicht in der Lage ist, diesen Grenzwert ad hoc beim Einbau von Asphalt zu erfüllen. Der festgestellte weite Wertebereich der Messergebnisse lässt darauf schließen, dass der bislang nicht ausreichend bekannte Einfluss der unterschiedlichen Randbedingungen auf das Emissionsverhalten sehr groß ist. Bei den durchgeführten Messungen ist auch zu beachten, dass sie bei realen Einbauten unter verschiedenen Witterungsbedingungen erfolgten und daher sehr unterschiedlichen äußeren Einflüssen ausgesetzt waren.

In dem Zeitraum bis 2024 ist nun die Asphalt- und die Bauindustrie gefordert, Möglichkeiten zur Reduzierung der Dämpfe und Aerosole zu entwickeln und erste Implementationen voranzutreiben. Neben den technischen Möglichkeiten ist es aber auch von grundlegendem Interesse, nähere Kenntnisse über die unterschiedlichen Bitumen, die Asphaltkonzeptionen und die Auswirkung von Zusätzen (Wachse, chemische Additive) zu erlangen. Der neu gegründete KoA Bit, in dem Bauindustrie und Berufsgenossenschaft gemeinsame Strategien entwickeln, mit

denen die Zukunft der Asphaltbauweise gesichert werden soll, arbeitet an kurz- und mittelfristig umzusetzenden Konzepten. Neben den technischen Möglichkeiten (z.B. Absaugung am Fertiger) sollen temperaturreduzierte Asphalte in Erprobungsstrecken prüftechnisch begleitet werden. Dies ist im Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 09/2021 vom 25.03.2021 mit dem Betreff „Durchführung von Erprobungsstrecken bei Baumaßnahmen an Bundesfernstraßen zum Einsatz von temperaturabgesenkten Walzasphalten in Verbindung mit Absaugeinrichtungen am Asphaltfertiger“ festgelegt.[9] Daneben sollen bestehende Strecken mit temperaturabgesenkten Asphalten näher untersucht werden und in einer dritten Säule sind Grundlagenforschungen zu Dämpfen und Aerosolen durchzuführen. Zu diesen Forschungen ist das vorliegende Projekt zu rechnen.

In dem Beschluss des Ausschusses für Gefahrenstoffe wird Bezug genommen auf Messungen mit dem Bitumenkondensat-Standard. Diese personenbezogenen Messungen sind geregelt in der BGIA-Empfehlung 6305/2 [11] (IFA 6305-2). Damit wäre der Bitumenkondensat-Standard, der in der BGIA-Empfehlung 6305/2 beschrieben ist, dem Mineralölstandard aus der BGIA-Empfehlung 6305/1 [12] vorzuziehen, da bei ersterem keine Umrechnungen nötig sind. Da der Bitumenkondensat-Standard nicht mehr verfügbar ist wird nach BGIA-Empfehlung 6305/1 gearbeitet.

Bei den BGIA-Empfehlungen 6305/2 [11] und 6305/1 [12] wird in einem Probenahmesystem bestehend aus einem Glasfaserfilter und nachgeschaltetem XAD-2-Adsorber mittels einer geeigneten Pumpe über fünf bzw. zwei Stunden ein definiertes Luftvolumen gesaugt. Das in der Luft enthaltene Bitumenaerosol wird vom Glasfaserfilter zurückgehalten, der Bitumendampf wird am XAD-2 adsorbiert. Die quantitative Auswertung erfolgt mittels Kalibrierkurven im Infrarotspektrometer. Als Vergleichsstandard wird ein repräsentatives Gemisch aus Bitumenkondensaten oder Mineralölen verwendet. Die so erhaltene Konzentration wird über die Parameter des Versuchs in die Konzentration der Aerosole und Dämpfe in mg/m^3 der beprobten Luft umgerechnet.

Die bisherigen Messungen der BG BAU wurden in situ, d.h. bei der Ausführung von Asphaltarbeiten durchgeführt. Wissenschaftliche Laborversuche auf deren Grundlage eine Beurteilung erfolgen kann, liegen derzeit nicht vor. Untersuchungen an Bitumen [13] zeigen, dass die Bildung von Dämpfen und Aerosolen abhängig ist von der Bitumenhärte, d.h. vom Anteil an „weichen“ Bestandteilen und von der Prüftemperatur. Laborversuche an Asphalt wurde vereinzelt in den Zentral-laboratorien der Asphalt- und Bauindustrie durchgeführt, umfangreiche Dokumentationen hierzu liegen aber nicht vor.

Mit Schreiben vom 08. September 2021 beauftragte die Bundesanstalt für Straßenwesen den Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München mit der Durchführung des Forschungsvorhabens FE 07.311/2022/AGB „Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt“.

2. Ziel des Vorhabens

Ziel des Forschungsprojektes ist es, eine Grundlage für die Einschätzung und Bewertung des Potenzials der aktuell technischen Möglichkeiten auf der Baustoffseite zur Reduzierung der Dämpfe und Aerosole bei der Heißverarbeitung von Bitumen zu schaffen.

Nach der Entwicklung einer Prüfsystematik zur Ermittlung der Dämpfe und Aerosole im Labor soll mit unterschiedlichen Bitumenhaltigen Bindemittel, viskositätsveränderten Bitumen und Zusätzen an unterschiedlichen Walzasphalten das Potential der Entwicklung von Dämpfen und Aerosolen ermittelt und der Einfluss von Temperatur und Bitumengehalt näher untersucht werden. Aus den Ergebnissen sind die Varianten mit dem größten Emissionsminderungspotential zu identifizieren.

Die identifizierten Varianten sind so aufzubereiten, dass im Rahmen von Folgeprojekten z. B. anhand von Erprobungsstrecken, Untersuchungen durchgeführt und die Einbauarbeiten messtechnisch begleitet werden können, so dass eine Einhaltung oder zumindest Annäherung an den Arbeitsplatzgrenzwert nachgewiesen werden kann. In Abhängigkeit der Erkenntnisse können die Technologien außerdem mit dem Ziel der Reduzierung der Dämpfe und Aerosole bei der Heißverarbeitung von Bitumen im Asphalt weiterentwickelt werden.

3. Untersuchungsprogramm

Durch die Auswahl der Proben soll ein repräsentativer Querschnitt der in Deutschland eingesetzten Walzasphalte und Bitumen bzw. Polymermodifizierten Bitumen nach den „Technischen Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen, Ausgabe 2007/Fassung 2013“ (TL Bitumen-StB) [14], viskositätsveränderter Bitumen nach den E KvB [7] sowie chemischer Zusätze (Tenside, Öle) sichergestellt werden (Tab. 3-1).

Hersteller/Zusatzlieferant	Bindemittel
A, B, C	50/70
	70/100
	25/55-55 A
	2x25/35 VL, 1x25/32 VH
	2x50/80 VL, 1x15/25 VL
	2xPmB 45/80 VL, 1xPmB 25/45 VL
D	Ein Produkt
E	Ein Produkt

Tab. 3-1: Einbezogene Bindemittel und Kombinationen.

Abweichend vom im Angebot vorgeschlagenen Untersuchungsprogramm wird aufgrund der Verfügbarkeit der Bindemittel bei einigen Herstellern auf alternative Produkte zurückgegriffen. An dieser Stelle sei den Bitumenherstellern für die gelieferten Bitumen gedankt.

Als Zusatz D wird ein Additiv auf Isocyanatbasis verwendet, welches eine Verarbeitung bei niedrigeren Mischguttemperaturen, den Einsatz von mehr Asphaltgranulat und eine längere Lebensdauer der Straßen ermöglichen soll. Zusatz E ist ein Additiv auf Fettaminbasis, welches die Verdichtung von Asphalt und die Haftung verbessern soll. Es sei auch den Zusatzherstellern für das Bereitstellen der Zusätze gedankt.

Für die einzubeziehenden Asphalte werden mit den bitumenhaltigen Bindemitteln Asphaltbetone für Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschichten sowie

Splittmastixasphalte hergestellt. Um einen Einfluss der Gesteine auszuschließen, kommen für alle Varianten Gesteinskörnungen gleicher Provenienz zum Einsatz. In den oben aufgeführten Asphalten kommen als feine und grobe Gesteinskörnungen Granodiorite sowie Kalksteinmehl als Fremdfüller zum Einsatz.

Ergänzend ist für orientierende Versuche für Asphaltbetone für Tragschichten Asphaltgranulat (Reclaimed Asphalt, RA) gemäß den „Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, Ausgabe 2009“ (TL AG-StB). [15] zu beschaffen, das dem Asphalt zugegeben werden kann.

Grundlage für die Asphaltkonzeption bilden die TL Asphalt-StB 07/13 bzw. die „Hinweise für die Planung und Ausführung von Alternativen Asphaltbinderschichten, Ausgabe 2015“, (H AL ABi) [16]. Es wurden die Asphaltarten /-sorten AC 8 D S, AC 16 B S SG, AC 22 T S, AC 22 T S mit 40 M.-% RA und SMA 8 S für die Untersuchungen ausgewählt. Im weiteren Text werden diese mit AC D, AC B, AC T, AC T RA und SMA abgekürzt.

Der zu wählende Prüfaufbau und die Analytik lehnen sich grundsätzlich an die Festlegungen der BGIA-Empfehlung 6305/1[12] an, um hierdurch möglichst viele Parallelen zu den Messungen beim Asphalteinbau zu schaffen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den Laborversuchen, bei denen die Absaugung aus einem quasi geschlossenen Labormischer erfolgt deutlich höhere Konzentrationen an Dämpfen und Aerosolen zu erwarten sind als sie bei Asphalteinbau unter Einfluss von Witterung und Wind auftreten. Die Übertragung der Laborergebnisse auf die Praxis muss im Nachgang zu dem Forschungsvorhaben erfolgen.

Grundlegende Untersuchungen mit Thermogravimetrie an den reinen Bindemitteln sollen Kenntnisse zu den enthaltenen emittierbaren Stoffen und dem Emissionsverhalten ergeben.

Die einschlägigen Normen zur Beurteilung der Exposition am Arbeitsplatz [17-19] werden bei der Konzeption der Prüfsystematik grundsätzlich berücksichtigt.

Durch den Einsatz eines Labormischers ist es möglich, unterschiedliche Messtemperaturen zwischen 120 und 160 °C über den gesamten Messzeitraum aufrecht zu erhalten. Für alle Versuche sind somit die vergleichbaren Rahmenbedingungen (z.B. Temperatur, Mischer-Drehzahl, Mischdauer und Mischprozess) sichergestellt.

Die Festlegung der Randbedingungen bei den Messungen der Dämpfe und Aerosole bezieht sich vor allem auf die Dauer der „Luftabsaugung“. Hierfür ist zu überprüfen, mit welcher Dynamik die Dämpfe und Aerosole auftreten, wann mit einem Abflachen der Kurve zu rechnen ist und wie viele Dämpfe und Aerosole aufgefangen werden müssen, um zielsichere und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Um diese Aspekte näher zu untersuchen und eine konstante Absaugdauer für alle Versuche festlegen zu können, werden Proben nach unterschiedlichen Zeitdauern (bis maximal 4 Stunden) entnommen.

Diese Untersuchungen erfolgen an einem Asphaltbeton mit einem Straßenbaubitumen und einem Polymermodifizierten Bitumen bei unterschiedlichen Temperaturen. Angedacht ist hierbei der Temperaturbereich von 120 bis 160 °C.

Aus diesen Untersuchungen sind die Versuchsbedingungen für die weiterführenden Versuche abzuleiten. Die Vorgehensweise für die Versuche wird in einer Arbeitsanleitung zusammengefasst, die als Grundlage für Versuche außerhalb des Forschungsvorhabens dienen soll.

Variation der Bitumen/Bitumenkombinationen und Asphalte

Mit den vorhandenen Bindemitteln werden Grunduntersuchungen an Asphaltbetonen und einem Splittmastixasphalt durchgeführt (59 Untersuchungsvarianten). Die Asphalte sollen hierbei den sich aus der Erstprüfung ergebenden optimalen Bindemittelgehalt aufweisen. Um eine Einordnung der verschiedenen Bitumen und bitumenhaltigen Bindemittel bzw. Bindemittelkombinationen zu erhalten, erfolgt die Versuchsdurchführung bei einer einheitlichen Temperatur von 160 °C, da bei dieser hohen Temperatur mit den meisten Dämpfen und Aerosolen zu rechnen ist. Anhand dieser Ergebnisse ist schon ersichtlich, wie sich die einzelnen Materialien verhalten, und es können Varianten für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt werden.

Die Untersuchungsvarianten für diese Untersuchungsphase I sind in der nachfolgenden Tab. 3-2 dargestellt.

	AC D	AC B	AC T	AC T mit AG	SMA
	1	2	3	4	5
50/70	A, B, C	A, B, C	A, B, C		A, B, C
70/100	A, B, C		A, B, C	A, B, C	
25/55-55 A	A, B, C				A, B, C
25/35 VL	B, C	A, B, C			B, C
25/35 VH	A	A			A
50/80 VL	A, C		A, C	A, C	
15/25 VL	B		B	B	
PmB 45/80 VL	B, C				B, C
PmB 25/45 VL	A				A
50/70 + D	A o. B o. C	A o. B o. C			A o. B o. C
50/70 + E	A o. B o. C	A o. B o. C			A o. B o. C
25/55-55 A + D	A o. B o. C				
25/55-55 A + E	A o. B o. C				

Tab. 3-2: Untersuchungsvarianten der Untersuchungsphase I. Die Kürzel A, B und C stehen für die Bindemittel verschiedener Hersteller bzw. Raffinerien und geben an von welchen Herstellern entsprechende Bindemittel bezogen werden. Bei mit „o.“ getrennten Einträgen wird einer der genannten Hersteller ausgewählt.

Variation des Bindemittelgehaltes und der Temperatur

Aus Untersuchungsphase I sind die Untersuchungsvarianten mit reproduzierbarsten Werten bei Wiederholungsmessungen auszuwählen. Als zweiter, untergeordneter Parameter wird die Höhe der absoluten Massen angesetzt. Dabei können nicht alle zuvor abgeprüften Felder belegt werden und es ergeben sich die in nachfolgender Tab. 3-3 aufgeführten Varianten für die Untersuchungsphase II.

	AC D	AC B	AC T	AC T mit AG	SMA
	1	2	3	4	5
50/70	A o. B o. C	A o. B o. C	A o. B o. C		
70/100				A o. B o. C	
25/55-55 A	A o. B o. C				A o. B o. C
25/35 VL 25/35 VH		A o. B o. C			
50/80 VL 15/25 VL	A o. B o. C		A o. B o. C	A o. B o. C	
PmB 45/80 VL PmB 25/45 VL	A o. B o. C				A o. B o. C
50/70 + D	A o. B o. C	A o. B o. C			A o. B o. C
50/70 + E	A o. B o. C	A o. B o. C			A o. B o. C

Tab. 3-3: Untersuchungsvarianten der Untersuchungsphase II. Die Kürzel A, B und C stehen für die Bindemittel verschiedener Hersteller bzw. Raffinerien und geben an von welchen Herstellern entsprechende Bindemittel bezogen werden. Bei mit „o.“ getrennten Einträgen wird einer der genannten Hersteller ausgewählt.

Für alle 18 Untersuchungsvarianten sind Messungen bei 120 °C und 140 °C durchzuführen, um hier den Einfluss der Temperatur ermitteln zu können. Es ist zu erwarten, dass die Temperatur den maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse ausübt. Da für die Varianten mit Asphaltgranulat eine zweite Zugabemenge mit zu prüfen ist, ergeben sich aus diesem Untersuchungsteil weitere 40 Varianten.

Zur Ermittlung des Einflusses des Bindemittelgehaltes werden die 18 Untersuchungsvarianten mit einem um 0,5 M.-% erhöhten und einem um 0,5 M.-%

% erniedrigten Bindemittelgehalt wiederum bei 160 °C geprüft. Somit ergeben sich in diesem Untersuchungsteil 36 weitere Varianten.

Die durchgeführten Untersuchungen sind zusammenfassend und vergleichend auszuwerten. In einem ersten Schritt sind Plausibilitätskontrollen und sich daran ggf. anschließende Nachuntersuchungen durchzuführen. In einem zweiten Schritt erfolgen statistische Auswertungen der zusammengehörigen Ergebnisse (getrennt nach Bindemittelart und –kombination, Asphaltart sowie Temperatur).

Aus der Auswertung der Untersuchungsergebnisse werden Empfehlungen für Maßnahmen zur Reduktion der Bildung von Dampf und Aerosolen abgeleitet und Vorschläge für die Umsetzung in der Praxis entwickelt. Diese Empfehlungen sind im Nachgang zu dem Forschungsvorhaben im Rahmen von Erprobungsstrecken zu verifizieren.

Aus den Untersuchungsergebnissen sollen die sich aus den Laborversuchen ergebenden Möglichkeiten der Temperaturreduzierung abgeleitet und für eine Umsetzung in die Praxis vorbereitet werden.

4. Entwicklung des Prüfverfahrens

4.1 Bekannte Prüfverfahren

Zur Ermittlung der Masse an freigesetzten Aerosolen und Dämpfen soll eine Prüfsystematik entwickelt werden, die an bestehende Verfahren für die Probenahme und Analyse auf Baustellen angelehnt ist. Als diese Basis dient die BGIA-Richtlinie 6305/1 [12] welche um Details aus „Messverfahren zur Bestimmung von Kühlschmierstoffen und sonstigen komplexen Kohlenwasserstoffgemischen in der Luft“ der IFA ergänzt wurde [20].

In diesen Vorschriften werden die Aerosole und Dämpfe mit Glasfaserfiltern und XAD-2 Adsorber aufgefangen. Diese werden in ein Gesamtstaub-/Gas-Probenahmesystem (GGP) eingebracht. Durch das GGP wird mit einer selbstregulierenden Pumpe für 2 h die zu beprobende Luft mit einer Rate von 3,5 l/min gepumpt. Bei Änderungen des Widerstands im Probenahmesystem korrigiert die Pumpe die Saugleistung, um den Volumenfluss konstant zu halten. Anschließend werden Adsorber und Filter mit 10 ml Tetrachlorethen (Trivialnamen: Perchlorethylen, Perchlor, Per) überschichtet und für mehr als 16 h im Kühlschrank bei 7 °C extrahiert. Nach der Extraktion werden die Gefäße auf Raumtemperatur erwärmt, das Extraktionsgefäß geschüttelt und die Lösung in eine IR-Küvette überführt (Quarzglas, 10 mm) (Bild 4-1). Bei Bedarf kann die Lösung um einen definierten Faktor mit Tetrachlorethen verdünnt werden. Die Probenlösung wird mittels Infrarotspektroskopie untersucht. Als Einstellungen für die Messungen ist eine 16-fache Spektren-Addition und eine Auflösung von 4 cm⁻¹ gegeben. Im gemessenen Spektrum wird im Wellenlängenbereich 3000 bis 2800 cm⁻¹ die integrale Extinktion bestimmt. Das im Messbereich liegende Messsignal besitzt vier Banden bei 2956 cm⁻¹, 2927 cm⁻¹, 2872 cm⁻¹ und 2857 cm⁻¹. Die Umrechnung der Extinktion in eine Masse an Aerosol und Dampf erfolgt über Kalibriergeraden. Diese werden mit Mineralölstandards im Massenbereich 0 bis 1 mg/ml, von denen jeweils 10 ml über Nacht über XAD-2 Adsorber und einem Glasfaserfilter im Kühlschrank

gelagert wurden, erstellt. Die Umrechnung von Mineralöl zu Bitumen erfolgt mit einem gegebenen Faktor von 1,4689.[11]

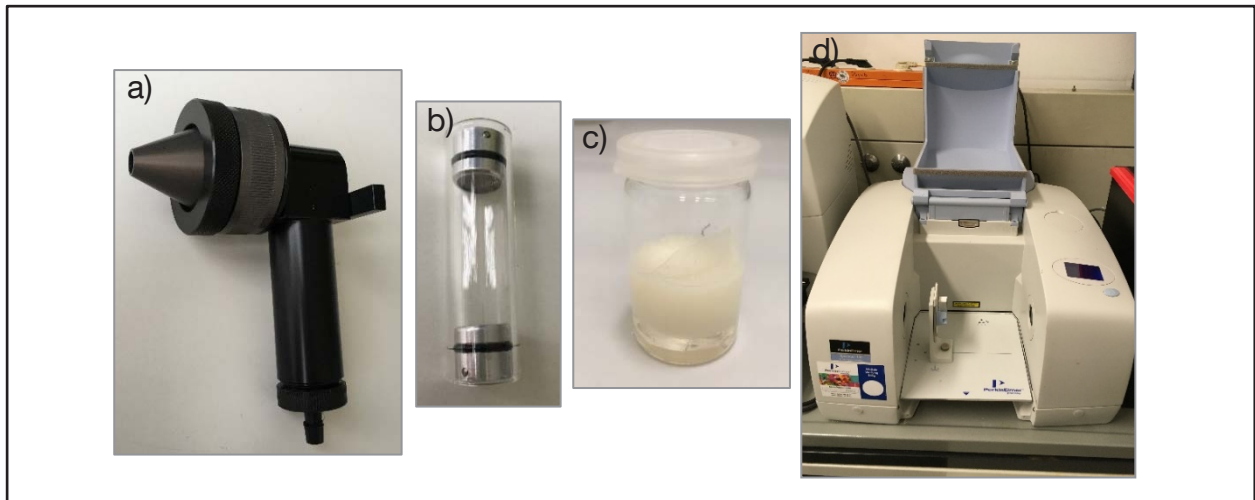


Bild 4-1: Ausgewähltes Material, welches für die Prüfung von Aerosolen und Dämpfen bei der Verarbeitung von bitumenhaltigen Bindemitteln notwendig ist: a) Gesamtstaub-/Gas-Probenahmesystem, b) Glaskartusche mit Siebdeckeln zum Einsetzen des XAD-2 Adsorbers in das GGP, c) Extraktionsgefäß für Adsorber und Filter mit Tetrachlorethen, d) Infrarotspektrometer mit Küvette.

4.2 Vorversuche mit Rotationsverdampfer

Für die Anpassung des Prüfverfahrens an die Entnahme aus geschlossenen Laborgeräten wird der Ansaugkonus des GGP (GSA Messgerätebau) durch einen Schlauchadapter ersetzt. Als weiteres Material wurden Glasfaserfilter MN 85/90 BF (\varnothing 37 mm, Macherey-Nagel), ein GGP (GSA Messgerätebau), je Messung ($2,60 \pm 0,05$) g XAD-2 Amberlite (Sigma-Aldrich) oder XAD-2 Supelpak (Supelco), Silikonschläuche, eine selbstregulierende Pumpe Typ SG5100ex (GSA Messgerätebau), Kolbenhubpipetten mit Polyethylen spitzen für den Proben transfer, Trichter mit Schwarzband-Filtern, IR-Quarzglas-Küvetten (PerkinElmer) und ein Spectrum 100 FT-IR Spektrometer (PerkinElmer) verwendet.

Zur Prüfung der Eignung der Analytik im Labor wurde in einem ersten Schritt Rotationsverdampfer mit ca. 100 g Bitumen als Emissionsquelle eingesetzt. Das Bitumen wurde im Vorlagekolben auf 160 °C erhitzt und am unteren Ende des Kühlers das Aerosol und die Dämpfe mit einem Volumenfluss von 3,5 l/min über 4 h abgesaugt. Der Ort der Frischluftzufuhr wurde variiert. In einigen Versuchen wurde am oberen Ende des Kühlers Frischluft zugeführt, in anderen Versuchen, über ein Metallrohr, direkt im Vorlagekolben. In diesen Experimenten konnten qualitativ einige kritische Parameter ermittelt werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Eignung des verwendeten Tetrachlorethens geprüft werden muss. Die in diesem Forschungsprojekt getesteten Lösungsmittel zeigten im Infrarotspektrum alle starke Absorption im Untersuchungsbereich. Es waren jedoch kaum Unterschiede zwischen Tetrachlorethen, welches für die Spektroskopie geeignet ist und technischem Tetrachlorethen zu erkennen. Eine Aufreinigung mittels Destillation war nicht möglich. Es ist zu empfehlen Lösungsmittel mit möglichst geringer Absorption im Untersuchungsbereich zu wählen, um einen möglichst großen Messbereich zu erhalten.

Ein weiterer Punkt, den es zu prüfen gilt, ist die Eignung der Arbeitsmittel. Die zu Beginn für die Filtration verwendeten Kunststoffspritzen mit Spritzenfilter zeigten deutliche Signale im Infrarotspektrum und wurden durch Trichter mit Schwarzband-Filtern ersetzt. Die Wahl des XAD-2 Adsorbers und dessen Vorbereitung hat sich ebenfalls als wichtig herausgestellt. Nicht-gereinigter Adsorber (z.B. XAD-2 Amberlite) oder bereits verwendeter und extrahierter Adsorber emittieren bei Extraktion weitere Stoffe, die den Blindwert im Infrarotspektrum deutlich erhöhen. Bereits verwendeter Adsorber kann mittels Soxhlet-Extraktion aufgereinigt werden und sollte anschließend über mehrere Tage, z.B. für zwei Tage, im Vakuumtrockenschrank bei 40 °C getrocknet werden. Eine Extraktionszeit von 3 h mit einer Zyklusrate von ca. 0,5 min⁻¹ führte zu guten Ergebnissen mit maximalen Extinktionen des Blindwertes in Infrarotspektren kleiner 0,15. Bei neuem nicht gereinigtem Adsorber sollte vor der Verwendung die Feinfraktion <0,5 mm und die

Grobfraktion >2 mm abgetrennt werden. Vor der Soxhlet-Extraktion sollte der Adsorber zudem zweimal mit frischem Ethanol für jeweils 1 h im Ultraschallbad behandelt werden.

Der Ort an dem die zu beprobende Luft abgesaugt und Frischluft zugeführt wird, hat ebenfalls einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Messung. Die beiden beschriebenen Aufbauten für die Frischluftzufuhr führten im Fall von Frischluftzufuhr am oberen Ende des Kühlers zu geringen gemessenen Aerosol- und Dampf-Massen, im Fall von Frischluftzufuhr direkt in den Vorlagekolben zu deutlichen höheren Werten.

Die infrarotspektroskopischen Messungen wurden in einem Bereich von 4000 bis 2550 cm^{-1} durchgeführt, um externe Einflüsse besser beurteilen zu können. Der Messbereich bei Wellenzahlen kleiner als 2550 cm^{-1} ist aufgrund von Absorptionen der Quarzglasküvette und des verwendeten Lösungsmittels nicht betrachtet worden.

Kalibriergeraden zur Auswertung der Messdaten werden erstellt indem Mineralölstandard für die Spektroskopie (Acros Organics) in Tetrachlorethen auf sechs verschiedene Konzentrationen im Bereich 0 bis 1 mg/ml verdünnt wird. Für jede Charge an gereinigtem Adsorber wird eine neue Kalibriergerade erstellt. Die Standardlösungen werden für mindestens 16 h über dem gereinigten Adsorber mit einem Glasfaserfilter gelagert, danach filtriert und mit Infrarotspektroskopie untersucht. Die Peaks werden im Bereich von 3000 bis 2800 cm^{-1} integriert. Die Kalibriergeraden der im Forschungsprojekt durchgeführten Messungen weisen einen Gütefaktor (R-Quadrat) > 0,99, eine Steigung von $(0,231 \pm 0,006)$ l/mg und einen Achsenabschnitt von $(3,3 \pm 1,6)$ auf. Die Standardabweichung des Achsenabschnitts kann als Maß für Unterschiede bei der Aufreinigung des Adsorbers betrachtet werden.

4.3 Festlegung der Parameter für Hauptversuche

Die Untersuchung der Asphalte in den Hauptversuchen erfolgt mit einem Labormischer für Asphalte (Infratest Labormischer 4-15 kg) als Emissionsquelle. Um die Probenluft direkt aus dem Innenraum über dem Mischgut entnehmen zu können, wurde ein Rohr an den Deckel des Mixers angebaut. Über Silikonschläuche wird der Labormischer mit dem Probenahmesystem (siehe 4.2) verbunden. Die Länge der Schläuche wurde ausreichend groß gewählt, um eine thermische Beschädigung des GGP und des Adsorbers durch die heißen Dämpfe zu verhindern. In Tests an Asphaltgranulat zeigte sich zudem, dass aus der Probe freigesetztes Wasser in den Schläuchen kondensiert und den Filter des GGP verstopfen kann. Um eine dadurch resultierende Notabschaltung der Pumpe zu verhindern, wurde eine Wasserfalle, ein Glasbauteil mit größerem Innendurchmesser als die Schläuche, vor das GGP eingebaut. Es ist davon auszugehen, dass die Länge der Leitung von Mischer zu Probenahmesystem Einflüsse auf die aufgefangene Menge an Dampf und Aerosol hat. Die eingesetzte Längen des Rohrs beträgt 54 cm (Innendurchmesser = 17 mm), die der Schläuche 108 cm zwischen Mischer und Wasserfalle und 31 cm zwischen Wasserfalle und GGP (Innendurchmesser = 8 mm) und der Wasserfalle 8 cm (Innendurchmesser ~ 3 cm) (Bild 4-2).

Für die Probenahme aus dem Labormischer werden für jede Asphaltart / -sorte der im Zuge der Erstprüfung ermittelte optimale Gesamtbindemittelgehalt und die sich bei einer resultierenden Asphaltmischgutmenge von je 6000 g berechnete Masse an Bindemittel zugegeben. Der Gesamtbindemittelgehalt der AC T RA mit einem Wert von 4,5 M.-% setzt sich aus 2,7 M.-% Zugabebindemittel und 1,8 M.-% Bindemittel aus dem Asphaltgranulat (Zugabe 40 M.-%) zusammen (Tab. 4-1).

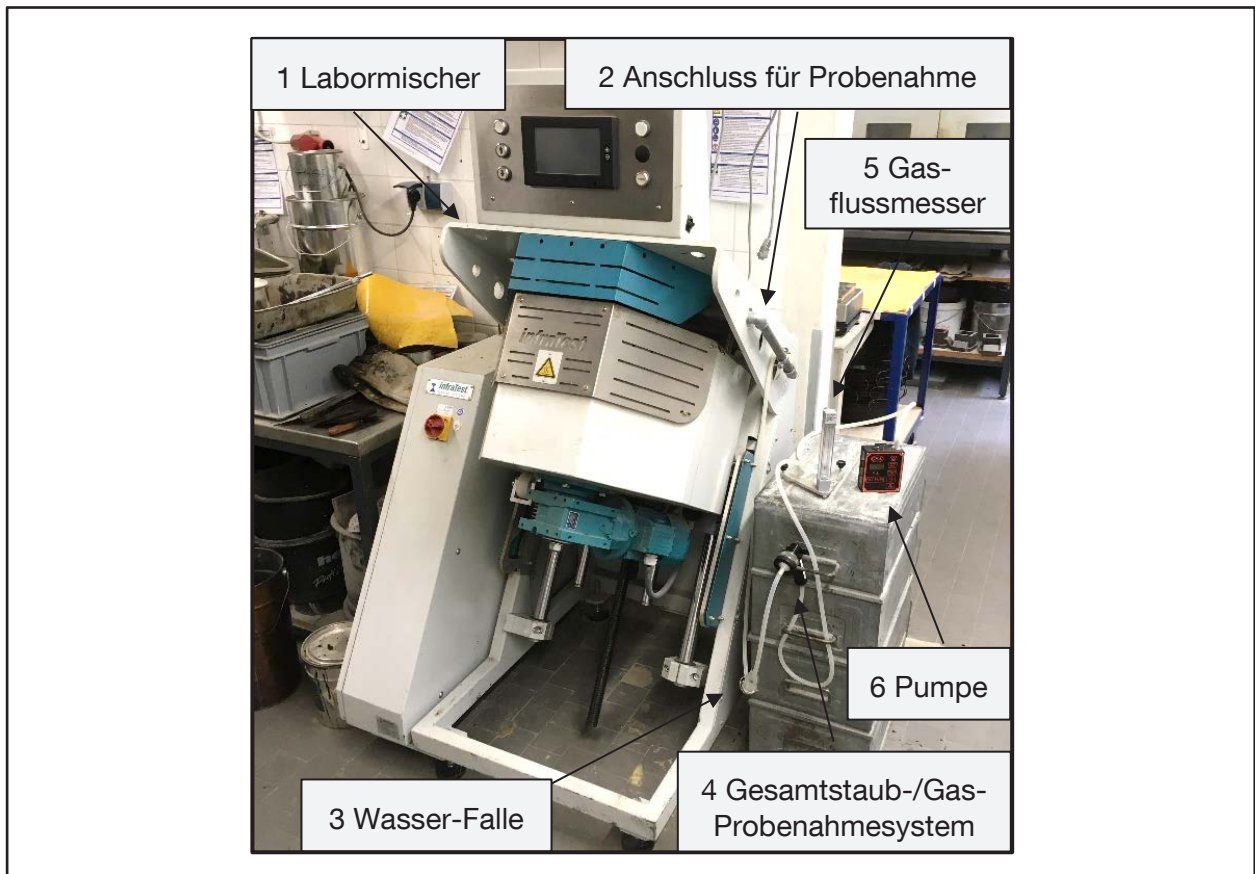


Bild 4-2: Modifizierter Labormischer (1, 2) mit Probenahmesystem (3-6).

Asphaltart / -sorte:	Gesamtbindemittelgehalt [M.-%]:	Masse Bindemittel [g]:
AC T	4,5	270
AC T RA	4,5	270
AC B	5,2	312
AC D	6,7	402
SMA	7,4	444

Tab. 4-1: Bindemittelgehalte der verschiedenen Asphaltarten/-sorten.

Die Komponenten der zu untersuchenden Asphaltmischungen werden auf 160 °C vortemperiert und im Mischer zusammengeführt. Die Probenahme an den Untersuchungsvarianten, welche bei 160 °C untersucht werden, startet sofort mit dem Start des Mixers. Während der Probenahme werden Temperatur, Mischer-Drehzahl und Probenluftstrom konstant gehalten.

Zur Ermittlung des Verhaltens der Dämpfe und Aerosole während des Mischvorgangs wurden in den ersten Versuchen Asphalte bei 160 °C für 4 h durchgängig bei einer Mischer-Drehzahl von 35 U/min durchmischt und in den Zeitintervallen 0-1 h, 1-2 h, 2-3 h und 3-4 h jeweils für eine Stunde Proben entnommen. Als erste Variante wurde ein Asphaltgranulat untersucht. Die verschiedenen Messintervalle ergeben hier Werte im Bereich von 12 bis 14 mg aufgefangenes Aerosol und Dampf. In einer weiteren Versuchsreihe wurden AC D mit den Bitumen 70/100 und 25/55-55 A bei 160 und 120 °C hergestellt und ebenfalls über 4 h Mischzeit untersucht. Bei 160 °C zeigen die Ergebnisse deutlich höhere Emissionen im Zeitraum 0-1 h, welche dann in den weiteren analogen Zeitintervallen bis zu 4 h relativ konstant blieben. Das Bitumen 70/100 emittiert mit ca. 60 mg in der ersten Stunde mehr als 25/55-55 A mit ca. 40 mg. In den folgenden Stunden gleichen sich beide Bitumen mit ca. 20 mg Emissionen an (Bild 4-3). Für die Versuche bei 120 °C ergab sich ein ähnlicher Verlauf mit geringeren absoluten Emissionen. Bei den höheren Emissionen war es notwendig die Extraktionslösung aufgrund der Messgrenzen und des kalibrierten Bereiches des Infrarotspektrometers um den Faktor 10 zu verdünnen.

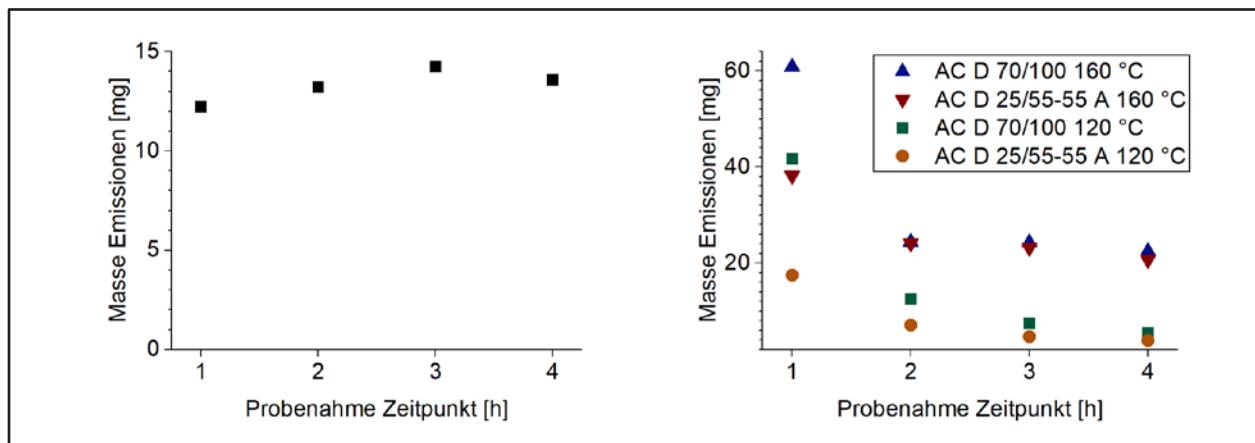


Bild 4-3: Vorversuche über eine Dauer von 4 h mit je 4 einstündigen Probenahmen. Links: Versuche an Asphaltgranulat, Rechts: Versuche an AC D mit unterschiedlichen Bindemitteln und Temperaturen.

Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Messwerte wurden jeweils zwei weitere Messungen in den Zeitintervallen 0-1 h und 1-2 h für die Mischungen AC D 70/100 und AC D 25/55-55 A bei 160 °C durchgeführt (Bild 4-4). Die Wiederholungsmessungen ergeben Standardabweichungen im Bereich von 20% für die Werte der ersten Stunde. Für die Werte der zweiten Stunde ergibt sich eine Standardabweichung von 28% für 70/100 und 10% für 25/55-55 A.

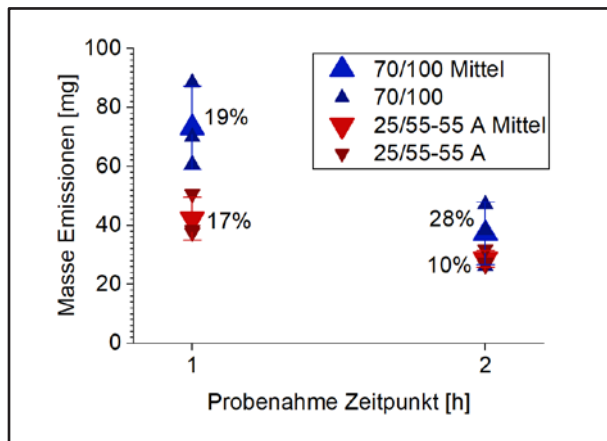


Bild 4-4: Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Messwerte anhand von Messungen an AC D mit den Bindemitteln 70/100 und 25/55-55 A in den ersten zwei Stunden der Verarbeitung bei 160 °C mit je drei Wiederholungen. Die Zahlen an den Messwerten und Fehlerbalken geben die Standardabweichung der jeweiligen Messpunkte wieder.

Zusätzlich wurde die Reproduzierbarkeit in Phase I geprüft, indem die Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 50/70 und 25/55-55 A jeweils doppelt durchgeführt wurden. Zur Einschätzung der Wiederholbarkeit der Messungen wurden die Mittelwerte der Doppelmessungen auf 1 normiert und die relative Standardabweichung berechnet. Für alle wiederholten Messungen ergab sich eine Standardabweichung von 12%. Aufgeteilt auf die Bitumenhersteller und Bindemittel ergaben sich folgende Standardabweichungen: A: 19%, B: 6%, C: 8%, 50/70: 13%, 25/55-55 A: 10%. Diese Daten deuten darauf hin, dass die Reproduzierbarkeit der Messwerte vom Bitumenhersteller oder einem gekoppelten Parameter abzuhängen scheint. Die Art des Bindemittels scheint bei der

Reproduzierbarkeit eine untergeordnete Rolle zu spielen. Für die Betrachtungen in „5. Untersuchungen an Asphalten“ werden die Mittelwerte der Ergebnisse der wiederholten Untersuchungsvarianten genutzt.

Auf Basis dieser Werte wird die erste Stunde der Probenverarbeitung im Mischer als Messzeitraum festgelegt. Die Streuung der Messwerte nach der Probenahme in der ersten Stunde und der zweiten Stunde liegen in der selben Größenordnung und es werden ausreichende Mengen an Aerosol und Dampf für die Analyse aufgefangen. Der qualitative Aufbau des Spektrums stimmt mit denen in der Vorschrift beschriebenen überein (Bild 4-5).

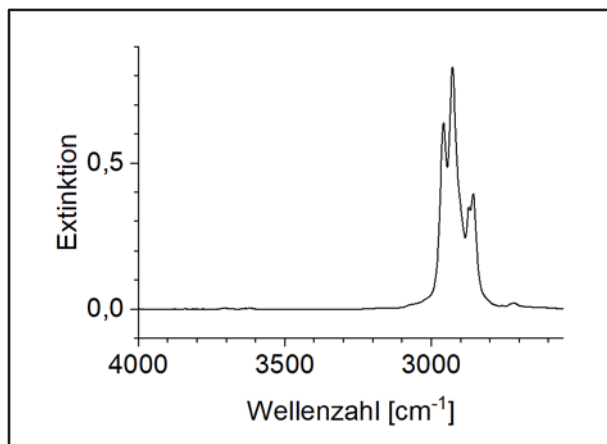


Bild 4-5: Infrarotspektrum des Extraktes von AC D mit Bitumen 50/70 von Hersteller A, mit 1 h Probenahme bei 160 °C. Es sind im Auswertebereich von 3000 bis 2800 cm⁻¹ vier Banden bei den Positionen 2958 cm⁻¹, 2927 cm⁻¹, 2872 cm⁻¹ und 2856 cm⁻¹ zu sehen.

Bei Versuchen, die mit den Zusätzen D und E durchgeführt werden, wird unmittelbar vor dem Mischen im Labormischer der Zusatz dem Bindemittel zugegeben. Zu dem auf 160 °C erhitzten Bindemittel werden von Zusatz D, nach Herstellerangaben 2 M.-% Zusatz bezogen auf das Bindemittel gegeben und für 15 s mit 400 bis 500 U/min eingerührt. Von Zusatz E werden nach Rücksprache mit dem Hersteller 0,75 M.-% in das heiße Bindemittel für 60 s mit 400 bis 500 U/min

eingerührt. Bindemittel mit Zusätzen werden direkt im Anschluss weiterverarbeitet und Reste verworfen.

Für Versuche der Phase II mit um 0,5 M.-% erhöhtem und 0,5 M.-% erniedrigtem Bitumengehalt wird die Masse an Gestein konstant gehalten und nur die Masse an Bitumen und damit Gesamtmasse variiert. Mit Ausnahme der Bitumenmasse werden diese Versuche analog zu den Versuchen in Phase I durchgeführt.

Das Asphaltmischgut für Probenahmen bei 140 und 120 °C wird analog zu den übrigen Untersuchungsvarianten bei 160 °C hergestellt und anschließend auf die Zieltemperatur abgekühlt. Das Asphaltmischgut wird dafür bei 160 °C für 3 min bei 35 U/min gemischt um eine optimale Homogenität und Benetzung zu gewährleisten. Im Anschluss wird die Probe unter minimaler Durchmischung (25 U/min für 3 s, Pause für 17 s) für entweder (25±5) min auf 140 °C oder (55±5) min auf 120 °C abgekühlt. Die minimale Durchmischung soll gewährleisten, dass möglichst wenig Aerosole und Dämpfe während des Abkühlens freigesetzt werden. Nach Erreichen der Zieltemperatur wird diese für 1 h gehalten und die Probenahme durchgeführt. Für die Versuche bei reduzierten Temperaturen werden ausreichende Mengen an Aerosol und Dampf für die Analyse aufgefangen. Eine weitere Verdünnung der Extrakte ist hier aufgrund der niedrigen Messwerten im Vergleich zu den Messungen bei 160 °C nicht notwendig. Die Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen bei unterschiedlichen Temperaturen wurde durch separate Versuche hergestellt. Hierzu wurden zwei Mischungen (SMA mit Bindemittel 25/55-55 A und AC T mit Bindemittel 15/25 VL) untersucht. Die Mischungen wurden bei 160 °C analog zu den übrigen Versuchen gemischt und während des Abkühlens auf 140 °C eine Probe entnommen. In einem zweiten Schritt wurden die Mischungen von 140 °C auf 120 °C abgekühlt und eine weitere Probe entnommen. Eine dritte Probe pro Mischung wurde im Anschluss für 60 min bei 120 °C entnommen um die Vergleichbarkeit der Messwerte zu den übrigen Messungen zu überprüfen. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tab. 4-2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen durch Vergleich mit Messungen aus dem Hauptprogramm,

dass Mischungen mit und ohne vorangegangener Probenahme während des Abkühlens ähnliche Emissions-Werte liefern.

Asphalt- art / -sorte:	Bindemittel	Emissionen beim Abkühlen von 160 °C auf 140 °C [mg]	Emissionen beim Abkühlen von 140 °C auf 120 °C [mg]	Emissionen bei 120 °C für 60 min [mg]
SMA	25/55-55 A	11,6	3,8	4,7
AC T	15/25 VL	8,4	4,2	4,9

Tab. 4-2: Ergebnisse der Probenahme während des Abkühlens.

4.4 Thermogravimetrische Versuche

Um weitere Informationen über die Menge an emittierbaren Stoffen und ihrer chemischen Natur zu erhalten wurden ausgewählte bitumenhaltige Bindemittel (25/35 VL und 25/55-55 A) thermogravimetrisch untersucht (Bild 4-6). Die Untersuchungen wurden mit einem Netsch STA 449 F3 durchgeführt. Es wurden je $(12,0 \pm 0,5)$ mg Bindemittel in Aluminiumtiegel eingewogen und im Argon-Strom mit $5,0 \text{ °C/min}$ bis 200 °C erhitzt.

Die Proben zeigen einen geringen Massenverlust im Bereich bis 200 °C . Für 25/35 VL liegt dieser bei $0,1 \text{ M.-%}$ und für 25/55-55 A bei $0,2 \text{ M.-%}$. Aufgrund des kleinen Messsignals lassen sich keine Aussagen über die Zusammensetzung der emittierten Stoffe treffen.

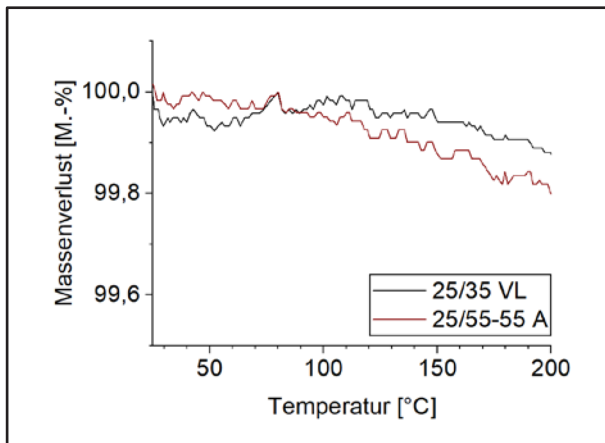


Bild 4-6: Thermogravimetrische Messungen der Bitumen 25/35 VL und 25/55-55 A im Bereich 25 bis 200 °C.

5. Untersuchungen an Asphalten

5.1 Untersuchungsergebnisse der Phase I: Variation der Bitumen/Bitumenkombinationen und Asphalte

Die Messergebnisse für die Emissionen (Masse der Aerosole und Dämpfe in mg) der Untersuchungsvarianten in der Phase I sind unter Berücksichtigung der Asphaltart / -sorte (AC D, AC B, AC T, AC T RA und SMA), des Bindemittels und des Bindemittelherstellers (A, B, C) in der Tab. 5-1 aufgelistet. Die Messwerte der Emission wurden stets als Summe über die Gesamtdauer des Mischzeitraumes von insgesamt 60 min bei einer gleichbleibenden Asphaltmischguttemperatur von 160 °C und Probenahmerate von 3,5 l/min ermittelt. In den Bildern 5-1 bis 5-4 und 5-6 sind die ermittelten Emissionen in Abhängigkeit vom Bindemittel und der Asphaltart dargestellt. Die Versuche mit den Zusätzen D und E werden, basierend auf den übrigen Ergebnissen aus den Vorversuchen und Phase I, an Bindemitteln von Hersteller B durchgeführt. Eine Auswertung dieser Versuche erfolgt aufgrund der zusätzlichen Daten, die in Phase II erhoben werden, in einer gemeinsamen Auswertung von Phase I und II (Kapitel 5.3).

Asphaltart/ -sorte	Bindemittel	Bindemittel- hersteller + Zusatz Hersteller	Ergebnisse Masse [mg]	Asphaltart/ - sorte	Bindemittel	Bindemittel- hersteller + Zusatz Hersteller	Ergebnisse Masse [mg]
AC D	50/70	A	47,7	AC T	50/70	A	37,4
AC D	50/70	B	34,5	AC T	50/70	B	21,4
AC D	50/70	C	17,6	AC T	50/70	C	15,6
AC D	50/70	B + D	25,3	AC T	70/100	A	55,2
AC D	50/70	B + E	28,6	AC T	70/100	B	26,5
AC D	70/100	A	86,8	AC T	70/100	C	17,6
AC D	70/100	B	29,8	AC T	50/80 VL	A	47,6
AC D	70/100	C	16,5	AC T	15/25 VL	B	18,3
AC D	25/55-55 A	A	43,1	AC T	50/80 VL	C	14,8
AC D	25/55-55 A	B	38,1	AC T RA	70/100	A	51,6
AC D	25/55-55 A	C	66,3	AC T RA	70/100	B	25,1
AC D	25/55-55 A	B + D	24,6	AC T RA	70/100	C	18,3
AC D	25/55-55 A	B + E	34,0	AC T RA	50/80 VL	A	50,7
AC D	25/35 VH	A	35,6	AC T RA	15/25 VL	B	16,3
AC D	25/35 VL	B	27,7	AC T RA	50/80 VL	C	12,6
AC D	25/35 VL	C	49,0	SMA	50/70	A	45,8
AC D	50/80 VL	A	67,3	SMA	50/70	B	29,2
AC D	15/25 VL	B	28,3	SMA	50/70	C	13,7
AC D	50/80 VL	C	19,7	SMA	50/70	B + D	20,3
AC D	PmB 25/45 VL	A	59,9	SMA	50/70	B + E	23,3
AC D	PmB 45/80 VL	B	19,3	SMA	25/55-55 A	A	52,2
AC D	PmB 45/80 VL	C	35,4	SMA	25/55-55 A	B	28,9
AC B	50/70	A	39,3	SMA	25/55-55 A	C	61,1
AC B	50/70	B	26,3	SMA	25/35 VH	A	37,9
AC B	50/70	C	15,1	SMA	25/35 VL	B	35,6
AC B	50/70	B + D	26,0	SMA	25/35 VL	C	33,7
AC B	50/70	B + E	24,4	SMA	PmB 25/45 VL	A	72,2
AC B	25/35 VH	A	39,9	SMA	PmB 45/80 VL	B	28,3
AC B	25/35 VL	B	26,9	SMA	PmB 45/80 VL	C	40,8
AC B	25/35 VL	C	29,6				

Tab. 5-1: Messergebnisse für die Emissionen (Masse der Aerosole und Dämpfe in mg) für die Untersuchungsvarianten in Phase I.

5.1.1 Auswertung nach Asphaltarten

Einen ersten Eindruck der Einflüsse auf die Emissionen liefert eine Betrachtung der Minimalwerte, Maximalwerte, Spannweiten und Mittelwerte der Emissionen der verschiedenen Asphaltarten / -sorten (Tab. 5-2). Zu beachten ist hier, dass nicht für alle Asphaltarten / -sorten sämtliche Bindemittel zum Einsatz kamen, was Auswirkungen auf die absoluten gemessenen Werte hat. Aus den Minimal- und Maximalwerten der Asphaltarten lässt sich ablesen, dass alle Messwerte zwischen

ca. 10 mg und 90 mg liegen. Die Minimalwerte zeigen eine relativ geringe Streuung. Der niedrigste Minimalwert (AC T RA) ist mit 12,6 mg nur etwa 30% kleiner als der Höchste (AC D) mit 16,5 mg. Die Unterschiede der Maximalwerte sind mit einem niedrigsten Wert von 39,9 mg (AC B) und einem höchsten Wert von 86,8 (AC D) mit 120% deutlich größer. Daraus resultiert eine größte Spannweite innerhalb einer Asphaltart für AC D und eine kleinste für AC B. Betrachtet man die Mittelwerte der Messungen der Asphaltarten so zeigen AC T, AC T RA und AC B ähnliche Werte von ca. 30 mg. Deutlich höher sind die Werte von SMA mit 40,0 mg und AC D mit 48,2 mg. Die höheren Werte können auf einen höheren Bitumengehalt gegenüber AC T, AC T RA und AC B zurückzuführen sein. Die niedrigeren Werte von SMA im Vergleich zu AC D könnten durch die dickeren Bindemittelfilme in SMA verursacht sein. Die Spannweiten für den AC T bzw. AC T RA (identischer Bindemittelgehalt) liegen mit 40,4 mg bzw. 39,0 mg auf dem nahezu gleichen Niveau.

Asphaltart / -sorte:	Minimalwert [mg]	Maximalwert [mg]	Mittelwert [mg]	Spannweite [mg]
AC T	14,8	55,2	28,3	40,4
AC T RA	12,6	51,6	29,1	39,0
AC B	15,1	39,9	29,5	24,8
AC D	16,5	86,8	48,2	70,3
SMA	13,7	72,2	40,0	58,6

Tab. 5-2: Auflistung der Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Spannweiten der verschiedenen Asphaltarten.

Eine genauere Betrachtung der einzelnen Untersuchungsvarianten aufgeteilt nach Asphaltart/-sorte kann weitere Informationen über den Einfluss der Bitumensorten und Bitumenhersteller liefern.

Untersuchungsergebnisse Asphaltbetone für Tragschichten (AC T)

Die für die in den Untersuchungsvarianten AC T gemessenen Emissionen des Bindemittelherstellers A weisen stets die höchsten, die des Herstellers C die niedrigsten Werte auf (Bild 5-1).

Die Untersuchungsvarianten mit Bindemittel 70/100 zeigen im Mittel die höchsten, jene mit 50/70 und 50/80 VL bzw. 15/25 VL ähnliche, niedrigere Emissionen.

Die gemessene Emission beim AC T für das Straßenbaubitumen 70/100 des Bitumenherstellers A liegt um ca. das 1,5-Fache oberhalb der entsprechenden Werte des Straßenbaubitumens 50/70, während die Bitumen der Hersteller B und C um das ca. 1,2-Fache höher liegen. Bei allen Bitumenherstellern zeigt sich, dass das weichere Straßenbaubindemittel 70/100 gegenüber 50/70 zu höheren Emissionen führen kann.

Der Bindemittelhersteller B konnte zum Zeitpunkt der Untersuchungen kein Produktmuster für das Bindemittel 50/80 VL zur Verfügung stellen, stattdessen wurde ein härteres Bindemittel 15/25 VL angeliefert und in die Untersuchungen mit einbezogen. Die Emissionen der Untersuchungsvarianten mit viskositätsverändertem Bitumen (50/80 VL bzw. 15/25 VL) liegen unterhalb jener mit Straßenbaubitumen 70/100 und mit Ausnahme des Bindemittelherstellers A auf einem vergleichbaren Niveau zum Straßenbaubitumen 50/70. In diesem Zusammenhang sei allerdings nochmals darauf verwiesen, dass das 15/25 VL deutlich härter als ein vergleichbares Straßenbaubitumen 50/70 ist und theoretisch aufgrund der höheren Härte geringe Emissionswerte aufweisen sollte.

Aufgrund der Messergebnisse zeichnet sich ab, dass sich der Bindemittelhersteller, die Bitumenart / -sorte aber auch die viskositätsverändernden Zusätze im Bindemittel, wenn auch in einem deutlich geringeren Maße, auf die Emissionswerte auswirken können.

Zudem gibt es Hinweise darauf, dass sich die Emissionswerte unter Verwendung von viskositätsverändertem Bitumen (50/80 VL bzw. 15/25 VL) ohne Absenkung der Asphaltmischguttemperatur tendenziell nur geringfügig absenken lassen.

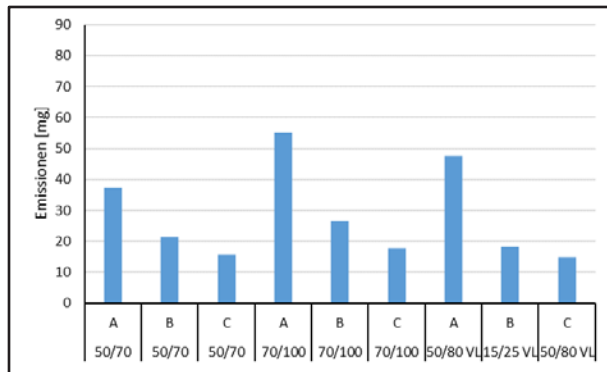


Bild 5-1: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC T sortiert nach Bindemitteln.

Untersuchungsergebnisse Asphaltbetone für Tragschichten unter Mitverwendung von Asphaltgranulat (AC T RA)

Analog zu den Ergebnissen zu den AC T weisen die Untersuchungsvarianten AC T RA mit einer 40 M.-% Zugabe an Asphaltgranulat von dem Bitumenhersteller A stets die höchsten und die des Herstellers C die niedrigsten Emissionen auf (Bild 5-2). Die Messwerte der Untersuchungsvarianten AC T RA liegen auf einem ähnlichen Niveau wie die der Untersuchungsvarianten AC T. Tendenzuell liegen die Werte der AC T RA Untersuchungsvarianten geringfügig unter denen der AC T, dementsprechend scheint das verwendete Asphaltgranulat einen geringfügig herabsetzenden Einfluss auf die Emissionen zu haben. Eine mögliche Ursache kann der reduzierte Gehalt an Frischbindemittel sein.

Tendenzuell zeigen sind die Messwerte der Untersuchungsvarianten mit 50/70 etwas höher als die der Bitumen 50/80 VL und 15/25 VL.

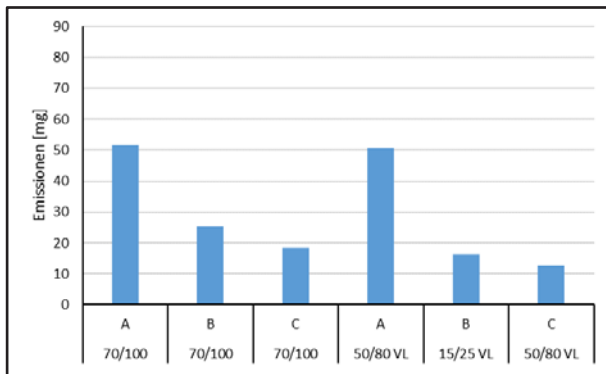


Bild 5-2: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC T RA sortiert nach Bindemitteln.

Untersuchungsergebnisse Asphaltbetone für Binderschichten (AC B)

Übereinstimmend mit den Untersuchungsergebnissen zu den AC T mit Straßenbaubitumen 50/70 hat sich bei den AC B die Reihenfolge der Emissionen der Bitumenhersteller bestätigt. Die gemessenen Emissionen der Untersuchungsvarianten mit viskositätsverändertem Bitumen (25/35 VL bzw. 25/35 VH) liegen mit Ausnahme des Bindemittelherstellers C auf einem vergleichbaren Niveau wie das Straßenbaubitumen 50/70 (Bild 5-3).

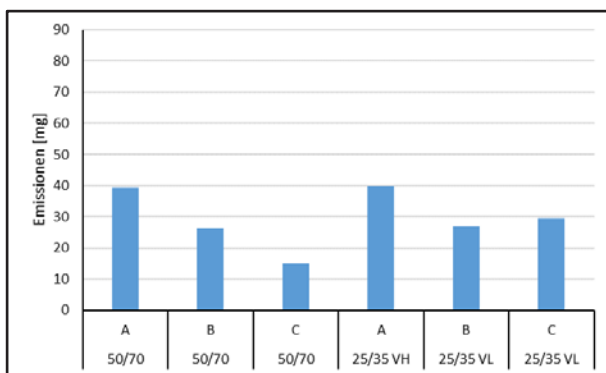


Bild 5-3: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC B sortiert nach Bindemitteln.

Untersuchungsergebnisse Asphaltbetone für Deckschichten (AC D)

Die Asphaltvariante mit dem Straßenbaubitumen 70/100 des Bindemittelherstellers A weist gegenüber jener mit 50/70 deutlich höhere Emissionen auf (Bild 5-4). Das Ergebnis der Messreihe AC T wird bestätigt. Im Gegensatz hierzu weisen die Untersuchungsvarianten AC D mit Straßenbaubitumen 50/70 des Bitumenherstellers B bzw. C etwas höhere Emissionswerte auf als jene mit Straßenbaubitumen 70/100.

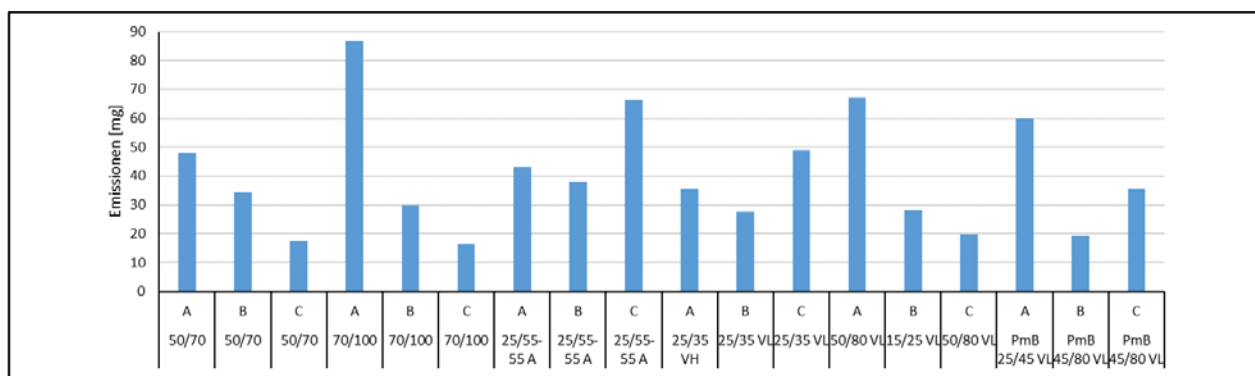


Bild 5-4: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC D sortiert nach Bindemitteln.

Mit Ausnahme der Untersuchungsvarianten mit polymermodifizierten Bindemittel 25/55-55 A und viskositätsmodifiziertem Bindemittel 25/35 VL bzw. 25/35 VH weist wiederum der Bindemittelhersteller A die höchsten Emissionen auf. Es bestätigt sich, dass die Bitumenhersteller einen maßgeblichen Einfluss auf die Emissionen aufweisen. Anhand der Ergebnisse der Untersuchungsvarianten mit 25/55-55 A bzw. PmB 45/80 VL kann angenommen werden, dass auch die zum Grundbindemittel zugegebenen Polymere aber auch viskositätsverändernde Zusätze einen Einfluss auf die Emissionen ausüben. Bei Bindemittelhersteller C zeigen die Infrarotspektren der Extrakte der Untersuchungsvarianten von 25/55-55 A und PmB 45/80 VL deutlich veränderte Signal-Muster im Bereich 3000 bis 2800 cm^{-1} im Vergleich zu allen anderen Messungen, was ebenfalls dafür spricht,

dass die Wahl des eingesetzten Polymers einen Einfluss auf die Emissionen hat (Bild 5-5).

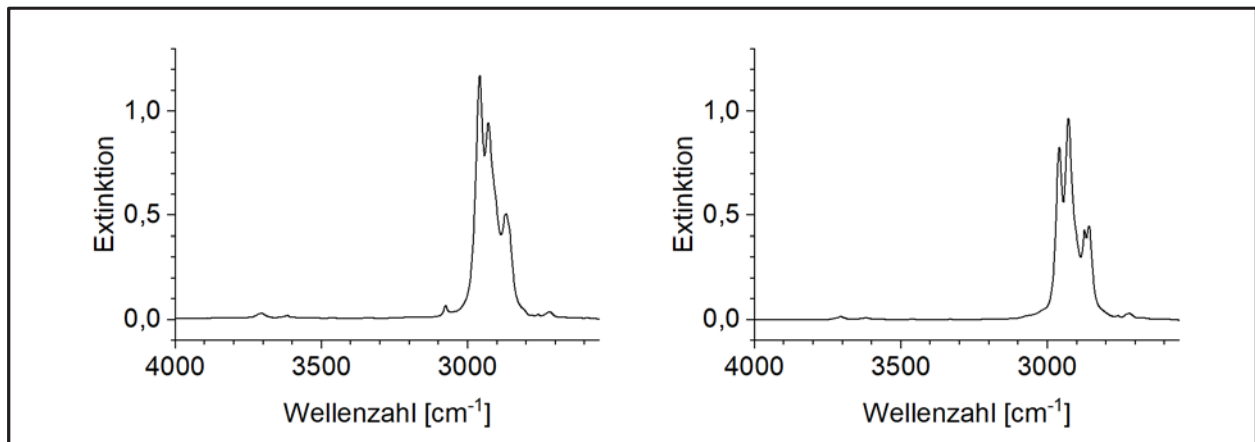


Bild 5-5: Links: Infrarotspektrum des Extraktes eines AC D mit Bitumen 25/55-55 A von Hersteller C, welches repräsentativ für alle Spektren von 25/55-55 A und PmB 45/80 VL von Hersteller C ist. Rechts: Infrarotspektrum des Extraktes eines AC D mit Bitumen 25/35 VL von Hersteller C, welches repräsentativ für alle Spektren aller übrigen Bindemittel aller Hersteller ist.

Untersuchungsergebnisse für Splittmastixasphalte (SMA)

Die Untersuchungsvarianten des Bindemittelherstellers A weisen mit Ausnahme des Bindemittels 25/55-55 A die höchsten Emissionen auf. Analog zu den Untersuchungsvarianten mit 25/55-55 A des AC D weist hier auch die Variante des Bindemittelherstellers C die höchsten Werte auf. Bei dem zweiten betrachteten PmB 45/80 VL bzw. PmB 25/45 VL liegt die Untersuchungsvariante von Hersteller C zwischen A und B. Bei den Bindemitteln 25/35 VH bzw. 25/35 VL liegen die Ergebnisse auf einem ähnlichen Niveau. Der Trend verläuft hier aber vergleichbar zu den Straßenbaubitumen ($A > B > C$) (Bild 5-6).

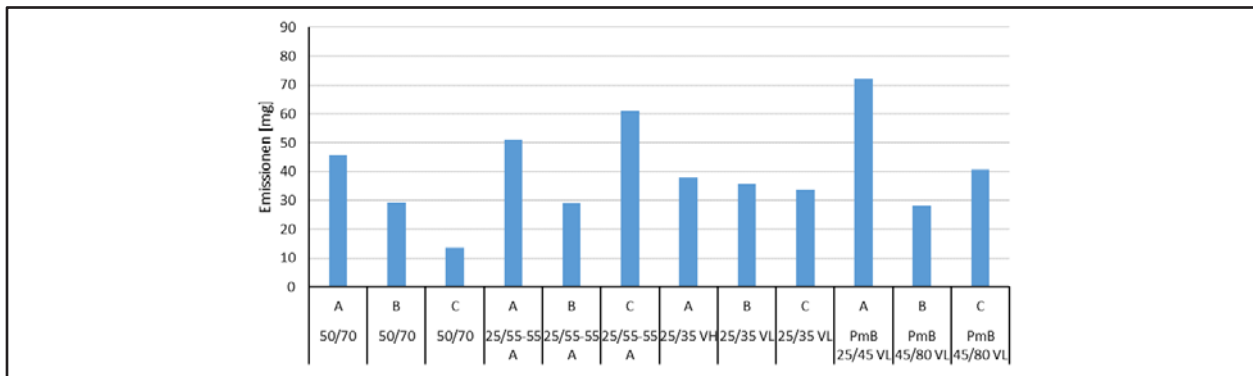


Bild 5-6: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten SMA sortiert nach Bindemittel.

5.1.2 Auswertung nach eingesetzten Zugabebindemitteln

Wie auch bei den Asphaltarten / -sorten liefern Minimalwerte, Maximalwerte und Mittelwerte der Emissionen der verschiedenen Bitumenarten/-sorten eine erste Übersicht über mögliche Einflüsse auf die Emissionen. Zu beachten ist hier, dass nicht alle Bitumenarten / -sorten in allen Asphaltarten / -sorten zum Einsatz kamen und die Bindemittel somit in unterschiedlichen Mengen eingesetzt wurden. Da nur die Bindemittel 50/70, 70/100 und 25/55-55 A von allen drei Herstellern zur Verfügung standen werden nur diese für die folgenden Betrachtungen genutzt. Im Mittel zeigt Straßenbaubitumen 50/70 mit 28,6 mg die niedrigsten, Straßenbaubitumen 70/100 mit 36,4 mg etwas höhere und 25/55-55 A die höchsten Emissionen. Auffällig ist hier die sehr hohe Spannweite der Messwerte von Bitumen 70/100, welche sowohl zu den höchsten als auch zu den niedrigsten gemessenen Werten in Phase I zählen und der relativ hohe Minimalwert von 25/55-55 A, welcher mit 28,9 mg deutlich höher ist als die Minimalwerte der Straßenbaubitumen. Auffällig bei den übrigen Bindemitteln ist, dass die Spanne der Messwerte für Bindemitteln, die nicht von allen drei Herstellern zur Verfügung standen kleiner wird (Tab. 5-3).

Bindemittelart / -sorte:	Minimalwert [mg]	Maximalwert [mg]	Mittelwert [mg]	Spannweite [mg]
50/70	13,7	47,7	28,6	34,0
70/100	16,5	86,8	36,4	70,3
25/55-55 A	28,9	66,3	48,3	37,4
PmB 25/45 VL	59,9	72,2	66,1	12,3
PmB 45/80 VL	19,3	40,8	31,0	21,5
15/25 VL	16,3	28,3	21,0	12,0
25/35 VL	26,9	49,0	33,8	22,1
50/80 VL	12,6	67,3	35,5	54,7
25/35 VH	35,6	39,9	37,8	14,3

Tab. 5-3: Auflistung der niedrigsten, höchsten, Mittelwerte und der Spanne der Werte der verschiedenen Bitumenarten/-sorgen. Es standen nur die Bindemittel 50/70, 70/100 und 25/55-55 A von allen Herstellern zur Verfügung.

Grundsätzlich wird bei den Auswertungen zu Asphaltbetonen erwartet, dass sich bei den Asphaltbetonen für Deckschichten aufgrund des höchsten Bindemittelgehalts, gefolgt von den Asphaltbetonen für Binder- und Tragschichten, die höchsten Emissionen auftreten. Es darf aber auch nicht außer Acht gelassen werden, dass sich aufgrund der Asphaltmischgutkonzeption unterschiedliche Füllvolumina im Asphaltmischer einstellen. Insbesondere beim Splittmastixasphalt können sich aufgrund der unterschiedlichen Asphaltart in der Asphaltmischgutkonzeption unter Mitverwendung von Bindemittelträgern (Cellulosefasern) dickere Bindemittelfilmen einstellen. Theoretisch wäre hier mit niedrigere Emissionen relativ zum Bindemittelgehalt zu rechnen.

In der Tab. 5-4 wird für jede Asphaltart / -sorte der im Zuge der Erstprüfung ermittelte optimale Gesamtbindemittelgehalt und die sich bei einer resultierenden Asphaltmischgutmenge von je 6000 g berechnete Masse an Bindemittel wiedergegeben. Für die weitere Betrachtung wird die Masse des Bindemittels der einzelnen Asphaltarten / -sorten auf die Masse des Bindemittels der AC T normiert, d.h. der AC T wird der Normierungsfaktor 1,00 zugeordnet.

Asphaltart / -sorte:	Gesamtbindemittelgehalt [M.-%]:	Masse Bindemittel [g]:	Normierungsfaktor
AC T	4,5	270	1,00
AC B	5,2	312	1,16
AC D	6,7	402	1,49
SMA	7,4	444	1,64

Tab. 5-4: Übersicht über die den Asphaltarten /-sorten der zugegebenen Bindemittelmengen mit Normierungsfaktor.

Durch eine separate Auswertung je Bitumenart bzw. -sorte kann zum einen ein Rückschluss des Einflusses der Asphaltart / -sorte und somit der eingesetzten Bindemittelmenge und des Bitumenherstellers erfolgen.

Untersuchungsergebnisse Straßenbaubitumen 50/70

Die Asphaltbetone (AC D, AC B und AC T) und Splittmastixasphalte (SMA) mit Straßenbaubitumen 50/70 des Bindemittelherstellers A weisen stets die höchsten gemessenen Emissionen auf (Bild 5-7). Sie liegen um mehr als das Zweifache oberhalb der Messwerte des Bindemittelherstellers C. Bei den untersuchten Asphaltbetonen weist AC D, gefolgt von AC B und AC T die höchsten Emissionen auf. Die Werte von SMA liegen im Mittel zwischen AC D und AC B.

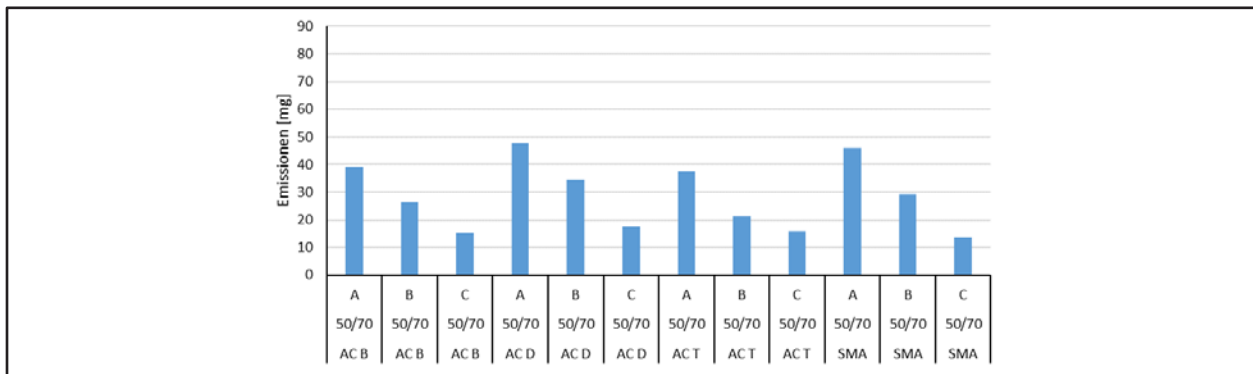


Bild 5-7: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Straßenbaubitumen 50/70 sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Auf Grundlage der zuvor bestimmten Normierungswerte wurde ausgehend von den ermittelten Messwerten für den AC T die theoretischen Messwerte berechnet (Tab. 5-5). Es zeigt sich, dass kein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Betrachtet man die tatsächlichen Normierungsfaktoren der Mittelwerte der einzelnen Asphaltarten fällt auf, dass diese kleiner ausfallen als die über die Bitumengehalte berechneten. Als tatsächliche Faktoren ergeben sich für AC B 1,08 (94% des theoretischen Normierungsfaktors), für AC D 1,34 (90%) und für SMA 1,19 (73%). Ursache können hier wie bereits erwähnte die dickeren Bindemittelfilme und somit kleinere emittierende Oberflächen der unterschiedlichen Asphaltarten / -sorten sein. Besonders auffallend ist der deutliche Unterschied zwischen den Normierungsfaktoren der SMA-Untersuchungsvarianten.

Straßenbaubitumen 50/70				
Asphaltart/ - sorte	Bindemittel- hersteller	Normierungsfaktor	Ergebnisse Masse [mg]	theor. Ergebnisse
AC T	A	1,00	37,4	
AC T	B	1,00	21,4	
AC T	C	1,00	15,6	
AC B	A	1,16	39,3	43,4
AC B	B	1,16	26,3	24,8
AC B	C	1,16	15,1	18,1
AC D	A	1,49	47,7	55,7
AC D	B	1,49	34,5	31,9
AC D	C	1,49	17,6	23,2
SMA	A	1,64	45,8	61,3
SMA	B	1,64	29,2	35,1
SMA	C	1,64	13,7	25,6

Tab. 5-5: Vergleich der Emissionen von Asphaltmischungen mit Straßenbaubitumen 50/70 mit erwarteten Emissionen basierend auf den Werten des AC T und des Bitumengehaltes.

Untersuchungsergebnisse Straßenbaubitumen 70/100

Für die Asphaltarten AC D, AC T und AC T RA mit Straßenbaubitumen 70/100 verhält sich die Reihung der gemessenen Emissionen analog zum Straßenbaubitumen 50/70 (Bild 5-8). Für AC D werden die höchsten Messwerte beobachtet, für AC T und AC T RA niedrigere. Von AC T zu AC T RA deutet sich hier eine weitere kleine Reduktion der Emissionen an. Die Messergebnisse des Bindemittelherstellers B liegen jeweils oberhalb der Messwerte des

Bindemittelherstellers C. Der Bindemittelherstellers A weisen stets die höchsten Emissionen auf.

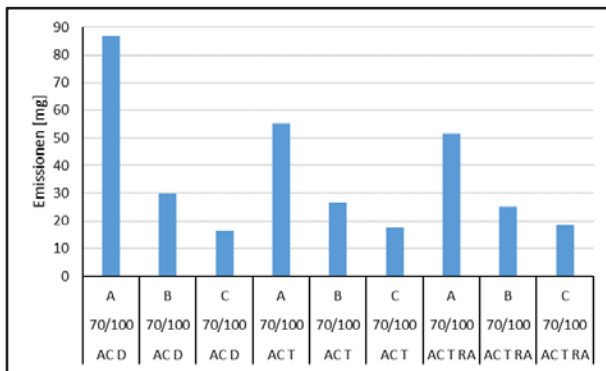


Bild 5-8: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Straßenbaubitumen 70/100 sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Untersuchungsergebnisse Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A

Bei den Untersuchungsvarianten für AC D und SMA mit Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A weist der Bindemittelhersteller C die höchsten und B die niedrigsten Werte auf (Bild 5-9). Auffällig ist hier, dass die Emissionen des Bindemittelherstellers C zum ersten Mal oberhalb jener der Bindemittelhersteller A und B liegen. Anscheinend wirken sich die dem Grundbindemittel zugegebenen Polymere, ggf. in Art und Menge, verstärkt aus. Im Mittel liegen die Emissionen für AC D mit einem Wert von 49,2 mg etwas höher als für SMA mit 47,4 mg.

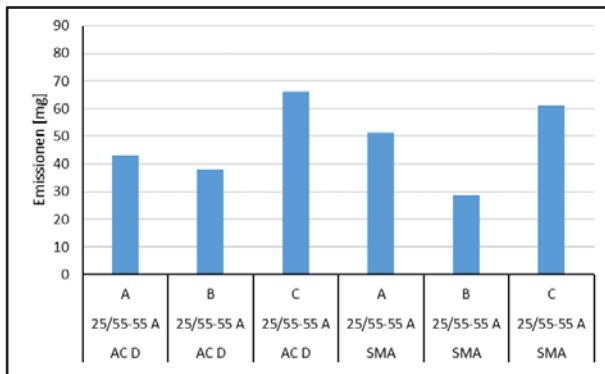


Bild 5-9: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Untersuchungsergebnisse mit viskositätsveränderten Bitumen PmB 45/80 VL bzw. PmB 25/45 VL

Die Messergebnisse für die Asphaltarten AC D und SMA mit viskositätsveränderten Bitumen PmB 45/80 VL bzw. PmB 25/45 VL nach den E KvB [7] des Bitumenhersteller A liegen um das ca. 1,7-fache oberhalb der Werte des Bindemittelherstellers C (Bild 5-10). Aufgrund des verwendeten härteren Bindemittels (PmB 25/45 VL) des Bindemittelherstellers A sind voraussichtlich niedrigere Emissionen zu beobachten als mit einem PmB 45/80 VL.

Der Bitumenhersteller B weist jeweils die niedrigsten Messergebnisse auf. Die Messergebnisse der SMA liegen über den Emissionen der AC D. Auffällig ist hier, dass die Emissionen des Bindemittelherstellers C, analog zum Polymermodifizierten Bindemittel 25/55-55 A, oberhalb jener des Bindemittelherstellers B liegen.

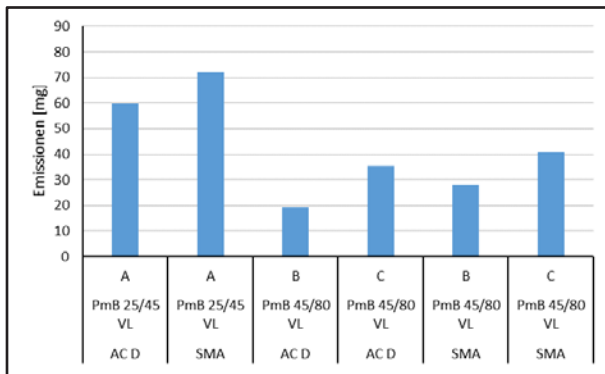


Bild 5-10: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem viskositätsveränderten Bitumen PmB 45/80 VL sortiert nach Asphaltart /-sorte.

Untersuchungsergebnisse mit viskositätsveränderten Bitumen 50/80 VL

Die Untersuchungsvarianten (AC D, AC T und AC T RA) mit viskositätsveränderten Bitumen 50/80 VL nach den E KvB [7] des Bitumenhersteller A liegen um mehr als das Dreifache über den Werten des Bitumenherstellers C (Bild 5-11). Erwartungsgemäß weisen die Untersuchungsvarianten AC T niedrigere Emissionswerte als die der entsprechenden AC D auf.

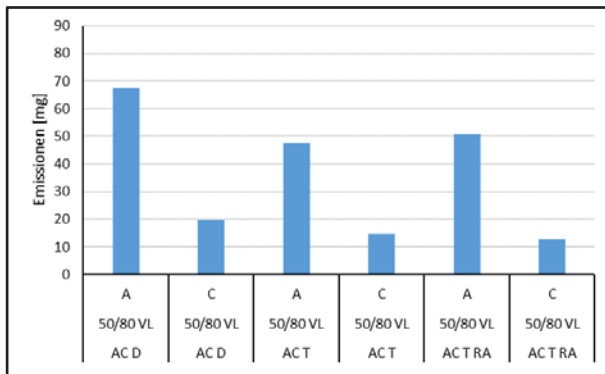


Bild 5-11: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem viskositätsveränderten Bitumen 50/80 VL sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Untersuchungsergebnisse mit viskositätsveränderten Bitumen 15/25 VL, 25/35 VH und 25/35 VL

Die Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 15/25 VL des Bitumenherstellers B weisen sowohl beim AC D, AC T und AC T RA die geringsten gemessenen Emissionen auf (Bild 5-12). Mögliche Gründe hierfür könnten zum einen die Bindemittelhärte als auch die eingesetzten Grundbitumen sein. Für 25/35 VL liegen die Emissionen mit Ausnahme beim SMA von Bindemittelhersteller C oberhalb der Werte des Bindemittelherstellers B. Es ist davon auszugehen, dass die zum Grundbindemittel gegebenen viskositätsverändernden Zusätze eine Auswirkung haben.

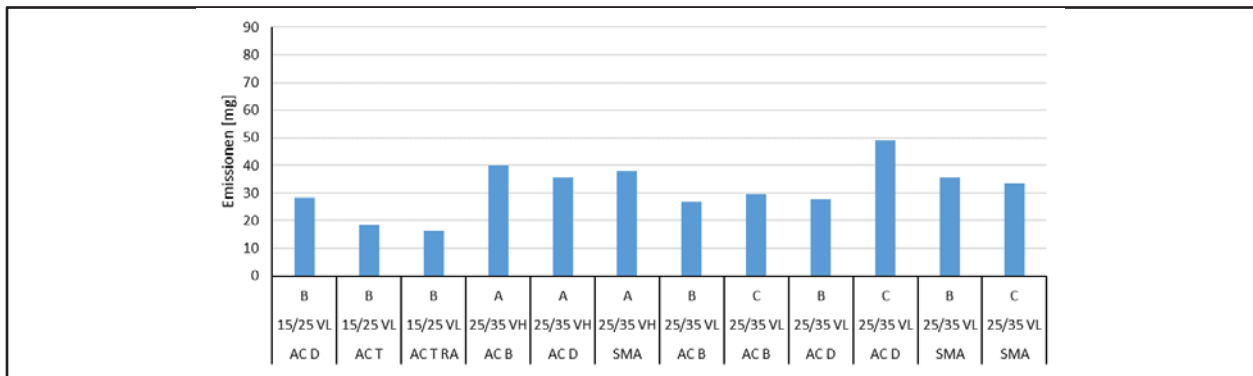


Bild 5-12: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den viskositätsveränderten Bitumen 15/25 VL, 25/35 VH und 25/35 VL sortiert nach Asphaltart / -sorte.

5.1.3 Zusammenfassung der Phase I

Die Auswertungen zu den untersuchten Untersuchungsvarianten zeigt auf, dass sich folgende Einflussfaktoren mit auf die Emissionen auswirken können.

- Asphaltart / -sorte
- Bindemittelart bzw. -sorte
 - Grundbindemittel
 - Art und Menge der zugegebene Polymere zum Grundbindemittel
 - Zugegebene Viskositätsverändernde Zusätze im Bindemittel
- Bitumenhersteller

Den stärksten Einfluss auf die Emissionen scheinen die Bitumenhersteller und Bindemittelart/-sorte zu haben. Ob die großen Unterschiede zwischen den Bitumenherstellern auf die Bitumenprovenienz oder den Herstellungsprozess zurückzuführen sind, kann hier nicht geklärt werden. Aussagen der Bindemittelhersteller legen nahe, dass die Herstellung des Bitumens eine entscheidende Rolle spielt und auch bei demselben Hersteller zwischen verschiedenen Raffinerien variieren kann. Die deutlichen Unterschiede der

Bindemittelart/-sorte sind wahrscheinlich zum Teil auf bestimmte Arten zugegebener Polymere in polymermodifizierten Bitumen (25/55-55 A bzw. PmB 45/80 VL) zurückzuführen. Der Einfluss der Asphaltart/-sorte auf die Emissionen fällt kleiner aus als erwartet.

5.2 Untersuchungsergebnisse der Phase II: Variation des Bindemittelgehaltes und der Temperatur

In Untersuchungsphase II wird der Einfluss der Temperatur und des Bindemittelgehalts auf die Emissionen von verschiedenen Asphaltarten / -sorten untersucht. Hierzu wird in den Untersuchungsvarianten die Temperatur auf 140 bzw. 120 °C abgesenkt oder der Bindemittelgehalt bei 160 °C Probenahmetemperatur um +0,5 M.-% erhöht oder um -0,5 M.-% erniedrigt. Der Versuchsaufbau, die Probenahmedauer von 60 min und einem Volumenfluss von 3,5 l/min sind identisch zu denen in Phase I.

Basierend auf den Ergebnissen aus den Vorversuchen und Phase I werden die Untersuchungen in Phase II an Bindemitteln von Hersteller B durchgeführt, da diese die bei Wiederholungsmessungen die geringste Streuung zeigen (Tab. 5-6).

Die Betrachtung des Einflusses der Asphaltgranulat-Zugabemenge und der Zusätze erfolgt in einer gemeinsamen Betrachtung der Daten aus Phase I und Phase II (Kapitel 5.3).

Asphaltart/-sorte	Bindemittel (Zusatz)	Bindemittelgehalt	Ergebnisse Masse [mg]	Asphaltart/-sorte	Bindemittel (Zusatz)	Temperatur [°C]	Ergebnisse Masse [mg]
AC D	50/70	+/-0 M.-%	34,5	AC D	50/70	160	34,5
AC D	50/70	+0,5 M.-%	28,0	AC D	50/70	140	4,2
AC D	50/70	-0,5 M.-%	27,4	AC D	50/70	120	7,6
AC D	25/55-55 A	+/-0 M.-%	38,7	AC D	25/55-55 A	160	38,1
AC D	25/55-55 A	+0,5 M.-%	38,4	AC D	25/55-55 A	140	17,9
AC D	25/55-55 A	-0,5 M.-%	39,6	AC D	25/55-55 A	120	8,3
AC D	15/25 VL	+/-0 M.-%	28,3	AC D	15/25 VL	160	28,3
AC D	15/25 VL	+0,5 M.-%	25,2	AC D	15/25 VL	140	9,1
AC D	15/25 VL	-0,5 M.-%	21,3	AC D	15/25 VL	120	3,7
AC D	PmB 45/80 VL	+/-0 M.-%	19,3	AC D	PmB 45/80 VL	160	19,3
AC D	PmB 45/80 VL	+0,5 M.-%	28,7	AC D	PmB 45/80 VL	140	9,9
AC D	PmB 45/80 VL	-0,5 M.-%	22,7	AC D	PmB 45/80 VL	120	3,4
AC D	50/70 (D)	+/-0 M.-%	25,3	AC D	50/70 (D)	160	25,3
AC D	50/70 (D)	+0,5 M.-%	19,4	AC D	50/70 (D)	140	3,6
AC D	50/70 (D)	-0,5 M.-%	23,5	AC D	50/70 (D)	120	2,8
AC D	50/70 (E)	+/-0 M.-%	28,6	AC D	50/70 (E)	160	28,6
AC D	50/70 (E)	+0,5 M.-%	17,1	AC D	50/70 (E)	140	5,0
AC D	50/70 (E)	-0,5 M.-%	24,8	AC D	50/70 (E)	120	3,4
AC B	50/70	+/-0 M.-%	26,3	AC B	50/70	160	26,3
AC B	50/70	+0,5 M.-%	32,8	AC B	50/70	140	6,0
AC B	50/70	-0,5 M.-%	27,8	AC B	50/70	120	2,7
AC B	25/35 VL	+/-0 M.-%	26,9	AC B	25/35 VL	160	26,9
AC B	25/35 VL	+0,5 M.-%	21,5	AC B	25/35 VL	140	6,6
AC B	25/35 VL	-0,5 M.-%	28,9	AC B	25/35 VL	120	2,6
AC B	50/70 (D)	+/-0 M.-%	26,0	AC B	50/70 (D)	160	26,0
AC B	50/70 (D)	+0,5 M.-%	16,9	AC B	50/70 (D)	140	8,7
AC B	50/70 (D)	-0,5 M.-%	15,5	AC B	50/70 (D)	120	2,6
AC B	50/70 (E)	+/-0 M.-%	28,6	AC B	50/70 (E)	160	24,4
AC B	50/70 (E)	+0,5 M.-%	19,2	AC B	50/70 (E)	140	12,9
AC B	50/70 (E)	-0,5 M.-%	21,5	AC B	50/70 (E)	120	6,1
AC T	50/70	+/-0 M.-%	21,4	AC T	50/70	160	21,4
AC T	50/70	+0,5 M.-%	24,6	AC T	50/70	140	11,9
AC T	50/70	-0,5 M.-%	21,7	AC T	50/70	120	3,2
AC T	15/25 VL	+/-0 M.-%	18,3	AC T	15/25 VL	160	18,3
AC T	15/25 VL	+0,5 M.-%	21,1	AC T	15/25 VL	140	9,3
AC T	15/25 VL	-0,5 M.-%	21,1	AC T	15/25 VL	120	2,1
AC T RA	70/100	+0,5 M.-%	24,1	AC T RA	70/100	160	25,1
AC T RA	70/100	-0,5 M.-%	15,8	AC T RA	70/100	140	10,2
AC T RA	15/25 VL	+0,5 M.-%	22,9	AC T RA	70/100	120	3,4
AC T RA	15/25 VL	-0,5 M.-%	16,5	AC T RA	15/25 VL	160	16,3
SMA	25/55-55 A	+/-0 M.-%	28,9	AC T RA	15/25 VL	140	8,2
SMA	25/55-55 A	+0,5 M.-%	22,2	AC T RA	15/25 VL	120	3,6
SMA	25/55-55 A	-0,5 M.-%	37,2	AC T RA (70%)	70/100	140	7,6
SMA	PmB 45/80 VL	+/-0 M.-%	38,1	AC T RA (70%)	70/100	120	2,3
SMA	PmB 45/80 VL	+0,5 M.-%	20,7	AC T RA (70%)	15/25 VL	140	7,6
SMA	PmB 45/80 VL	-0,5 M.-%	21,7	AC T RA (70%)	15/25 VL	120	2,3
SMA	50/70 (D)	+/-0 M.-%	20,3	SMA	50/70	140	5,4
SMA	50/70 (D)	+0,5 M.-%	22,6	SMA	50/70	120	3,8
SMA	50/70 (D)	-0,5 M.-%	22,2	SMA	PmB 45/80 VL	160	28,3
SMA	50/70 (E)	+/-0 M.-%	23,3	SMA	PmB 45/80 VL	140	6,4
SMA	50/70 (E)	+0,5 M.-%	23,2	SMA	PmB 45/80 VL	120	5,1
SMA	50/70 (E)	-0,5 M.-%	24,4	SMA	50/70 (D)	160	20,3
				SMA	50/70 (D)	140	6,3
				SMA	50/70 (D)	120	3,5
				SMA	50/70 (E)	160	23,3
				SMA	50/70 (E)	140	5,8
				SMA	50/70 (E)	120	2,9

Tab. 5-6: Messergebnisse für die Emissionen (Masse der Aerosole und Dämpfe in mg) für die Untersuchungsvarianten in Phase II. Vergleichsmessungen aus Phase I sind ebenfalls mit der Bezeichnung „+/-0 M.-%“ oder „160“ (kursiv) gelistet. Links: Variation des

Bindemittelgehaltes. Rechts: Variation der Temperatur. Bei Einsatz der Zusätze D und E werden diese in Klammern in der Spalte „Bindemittel (Zusatz)“ erwähnt.

5.2.1 Variation des Bindemittelgehaltes

Aufgrund der Untersuchungen zeigt sich, dass sich eine Erniedrigung bzw. Erhöhung des Bindemittelgehalts um $\pm 0,5$ M.-% nicht systematisch auf die Emissionen auswirkt (Bild 5-13 - Bild 5-17).

Aus den Betrachtungen der Phase I zu den verschiedenen Asphaltarten / -sorten ergibt sich eine Variation der Emissionen, die mit dem Bindemittelgehalt zusammenhängen kann. Asphalte mit höheren Bindemittelgehalten zeigen tendenziell höhere Emissionen. Die Unterschiede der Bindemittelmengen zwischen den verschiedenen Asphaltarten / -sorten (AC D, AC B, AC T, SMA) überschreitet die hier betrachteten $\pm 0,5$ M.-%. Eine Variation der Bindemittelmengen der gleichen Asphaltart / -sorte sollte demnach vergleichbare aber kleinere Effekte hervorrufen, es sind jedoch keine auffälligen Unterscheide zu erkennen.

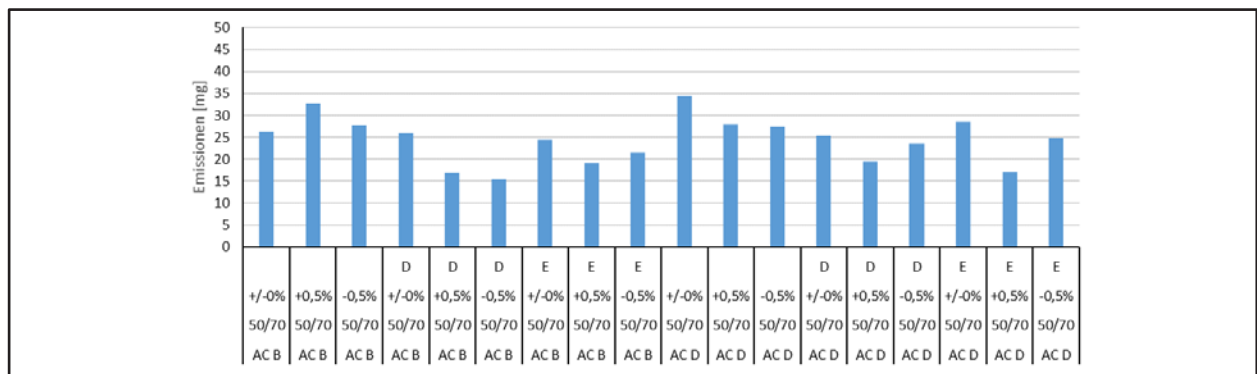


Bild 5-13: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC B und AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

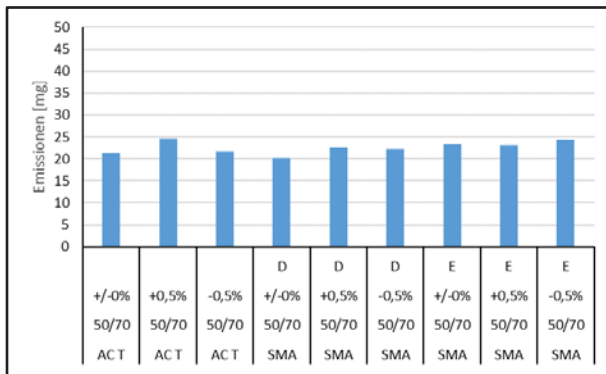


Bild 5-14: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten ACT und SMA mit dem Bindemittel 50/70 mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

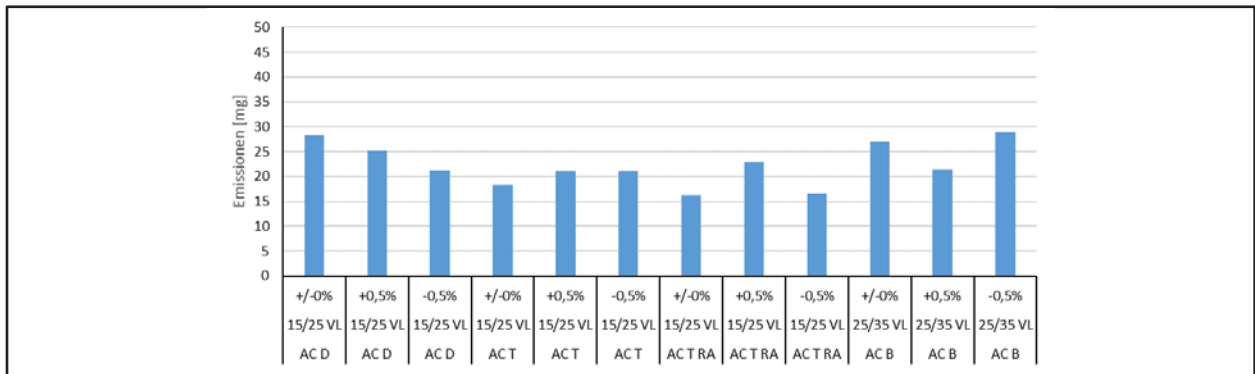


Bild 5-15: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 15/25 VL und 25/35 VL mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

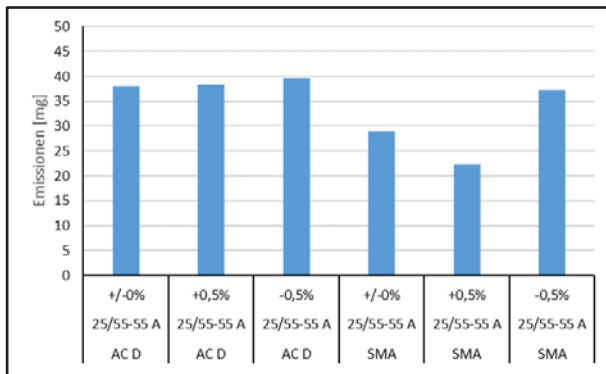


Bild 5-16: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55 A mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

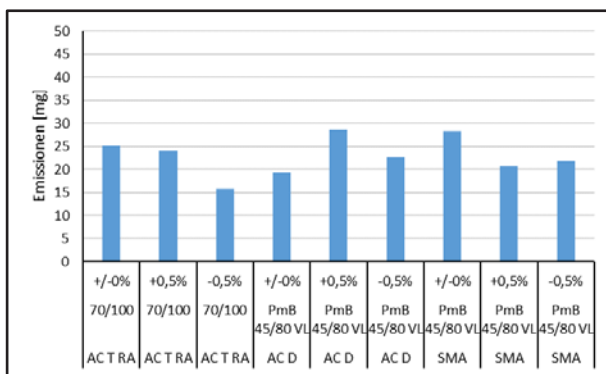


Bild 5-17: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 70/100 und PmB 45/80 VL mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

Um eventuelle, nicht augenscheinliche Unterschiede festzustellen wurden die Daten zusätzlich rechnerisch ausgewertet. Hierzu wurden die zusammengehörigen Messwerte, d.h. Messwerte von Untersuchungsvarianten mit gleicher Asphaltart / sorte, gleichem Bindemittel, gleichen Zusätzen und gleicher Temperatur in den Variationen +/-0 M.-%, +0,5 M.-% und -0,5 M.-% auf ihren Mittelwert normiert und aus diesen relativen Emissionen der Mittelwert und die Standardabweichung über jeweils alle Proben der Kategorien +/-0 M.-%, +0,5 M.-% bzw. -0,5 M.-%

berechnet. Für die Proben mit +/-0 M.-% ergaben sich ein Mittelwert und eine Standardabweichung von $1,04 \pm 0,14$, für +0,5 M.-% $0,98 \pm 0,14$ und für -0,5 M.-% $0,98 \pm 0,11$ (Bild 5-18). Die relativ hohen Standardabweichungen der Werte legen nahe, dass die kleinen Unterschiede in den relativen Emissionen keine signifikanten Unterschiede darstellen. Es ist also davon auszugehen, dass die Auswirkungen von kleinen Variationen im Bindemittelgehalt kleine Auswirkungen auf die Aerosol-Emissionen haben. Diese scheinen zu klein zu sein, um sie mit der angewendeten Prüfsystematik erfassen zu können.

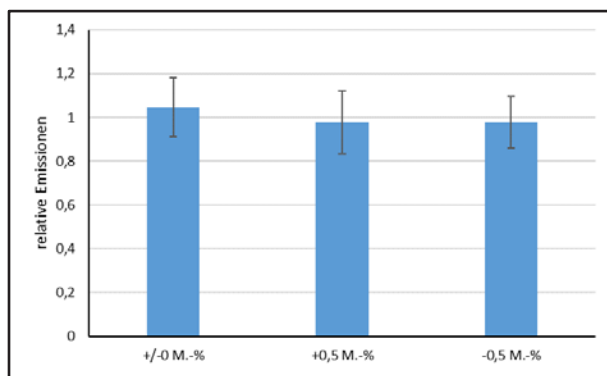


Bild 5-18: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Probengruppen +/-0 M.-%, +0,5 M.-% und -0,5 M.-%. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

5.2.2 Variation der Temperatur

Es wurden Versuche bei 140 °C und 120 °C durchgeführt und mit den Ergebnissen der Messungen aus Phase I verglichen. Die Variation der Temperatur führt zu deutlichen Veränderungen der Emissionen. Die Untersuchungen, die bei 140 °C durchgeführt wurden, zeigen eine Reduktion auf weniger als die Hälfte im Vergleich zu Untersuchungen bei 160 °C. Für die Temperaturen 140 und 120 °C lässt sich eine analoge Reduktion feststellen (Bild 5-19 - Bild 5-23).

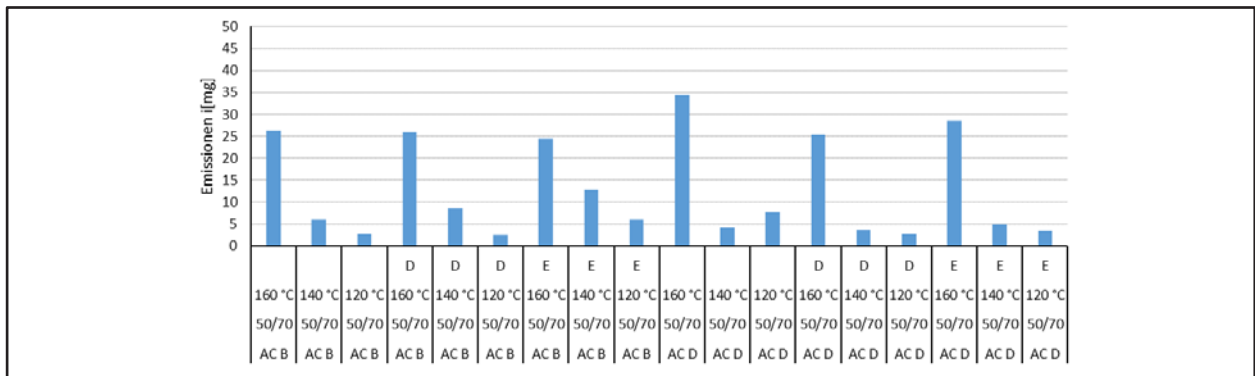


Bild 5-19: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC B und AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.

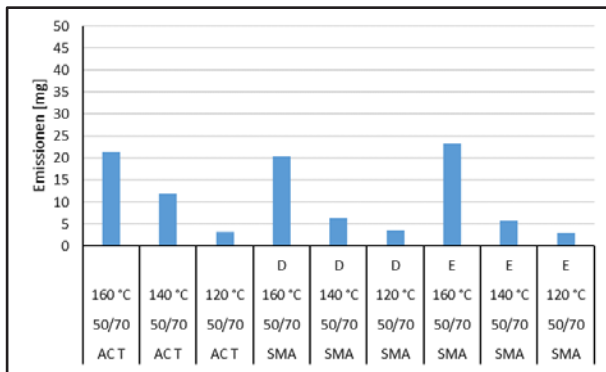


Bild 5-20: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten ACT und SMA mit dem Bindemittel 50/70 mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.

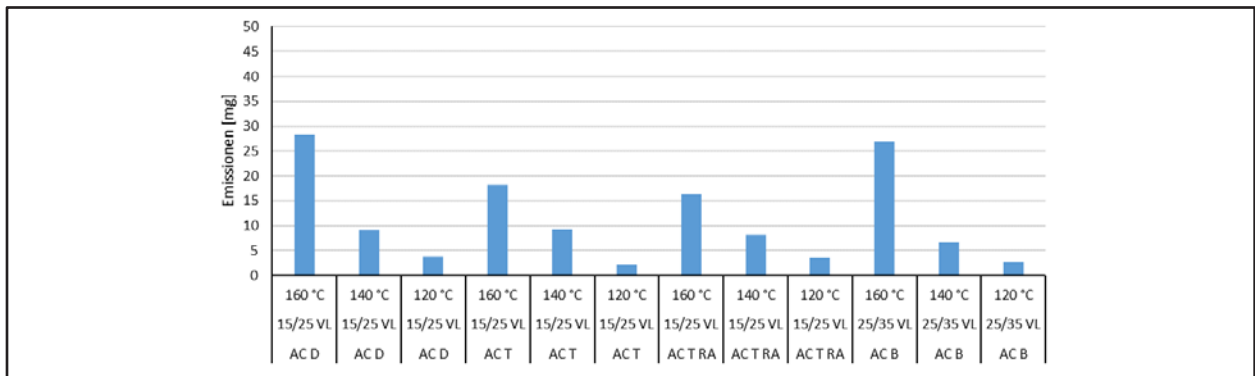


Bild 5-21: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 15/25 VL und 25/35 VL mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.

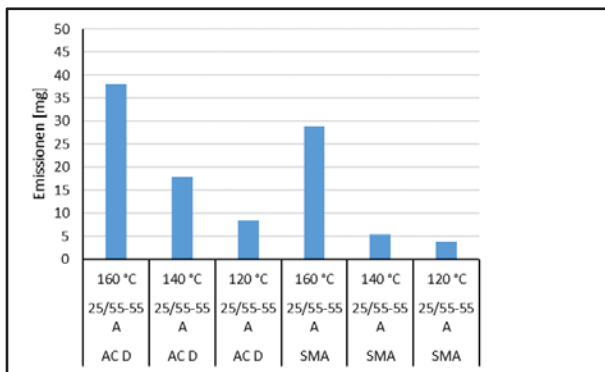


Bild 5-22: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55 A mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.

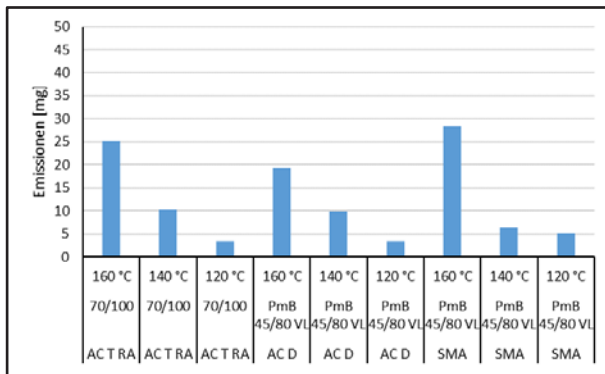


Bild 5-23: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 70/100 und PmB 45/80 VL mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.

Für eine detailliertere Einordnung der Unterschiede der Emissionen bei Variation der Temperatur werden die Daten rechnerisch ausgewertet. Zusammengehörige Messwerte (Untersuchungsvarianten gleicher Asphaltart / - sorte, mit gleichem Bindemittel, gleicher Bindemittelmenge und gleichen Zusätzen bei den Temperaturen 160 °C, 140 °C und 120 °C) werden auf ihren Mittelwert normiert um relative Emissionen zu erhalten. Aus diesen relativen Emissionen werden jeweils für 160 °C, 140 °C und 120 °C der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Für die Temperatur 160 °C ergibt sich so ein Wert von $2,03 \pm 0,21$, für 140 °C $0,66 \pm 0,21$ und für 120 °C $0,30 \pm 0,08$ (Bild 5-24). Im Mittel ergibt sich so eine Reduktion auf ein Drittel bei der Temperaturabsenkung von 160 auf 140 °C und eine weitere Reduktion auf die Hälfte bei einer Temperaturabsenkung von 140 auf 120 °C. Die absolute Reduktion der Menge an freigesetztem Dampf und Aerosol ist somit bei der Temperaturreduktion von 160 auf 140 °C deutlich größer als von 140 auf 120 °C. Die Reduktion der Emissionen ist wahrscheinlich auf eine Reduktion des Dampfdrucks der einzelnen Komponenten im Bindemittel zurückzuführen. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Experimente unterschiedliche Vorlaufzeiten (Mischzeiten und Abkühlzeiten) vor der Probenahme beinhalten, in der Verluste an emittierbarem Material auftreten können.

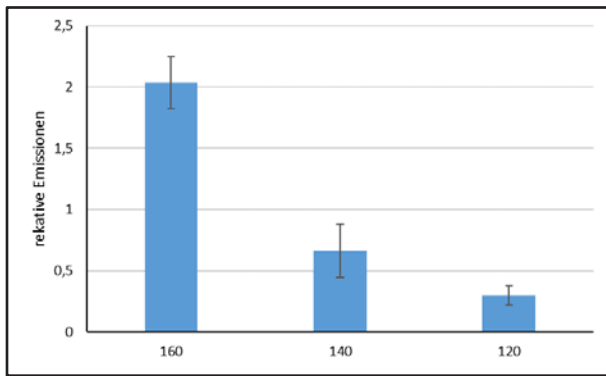


Bild 5-24: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Probengruppen 160 °C, 140 °C und 120 °C. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

5.2.3 Zusammenfassung der Phase II

Die Ergebnisse der in Phase II untersuchten Asphalte deuten bisher auf folgende Zusammenhänge an:

- Die Variation des Bindemittelgehalts um $\pm 0,5$ M.% führt zu keinen systematischen Veränderungen der Emissionen
- Die Reduktion der Temperatur führt zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen, vor allem im Vergleich 160 °C und 140 °C

5.3 Gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse aus Phase I und Phase II: Variation des Asphaltgranulatanteils und der Zusätze

5.3.1 Variation des Asphaltgranulatanteils

Es wurden Versuche ohne, mit 40 M.-% und mit 70 M.-% Asphaltgranulat durchgeführt. Die Variation des Asphaltgranulatanteils führt zu kleinen Veränderungen der Emissionen. Tendenziell scheinen die Emissionen mit zunehmendem Asphaltgranulatanteils leicht abzunehmen (Bild 5-25 - Bild 5-26).

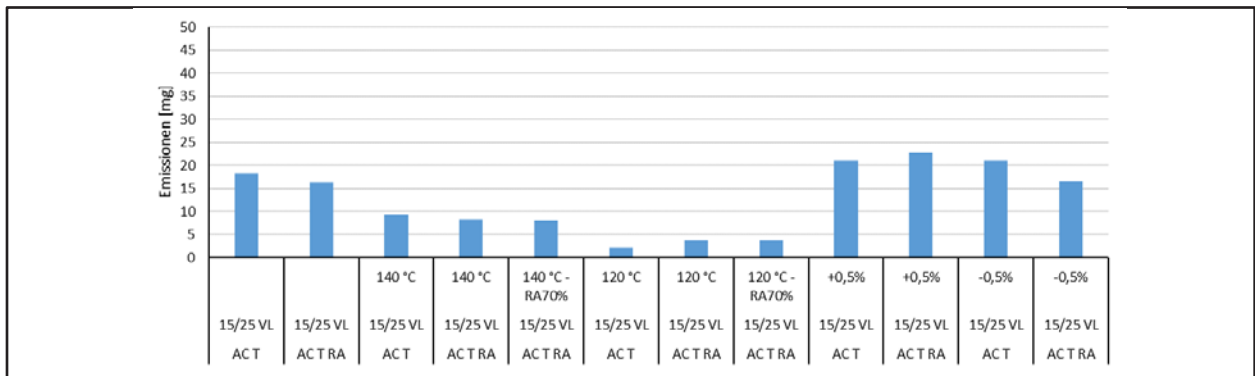


Bild 5-25: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 15/25 VL mit einer Asphaltgranulatanteil von 0 („AC T“), 40 („AC T RA“) bzw. 70 M.-% („AC T RA70%“).

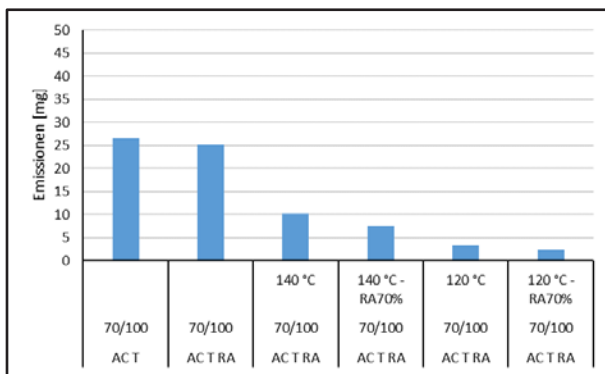


Bild 5-26: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 70/100 mit einer Asphaltgranulatanteil von 0 („AC T“), 40 („AC T RA“) bzw. 70 M.-% („AC T RA70%“).

Um abschätzen zu können ob die beobachteten Unterschiede signifikant sind, wurden die Daten rechnerisch ausgewertet. Da von den Mischungen nur in wenigen Fällen alle drei Varianten 0, 40 und 70 M.-% RA vorlagen, wurden für die Auswertung der Vergleich von 0 und 40 M.-% RA bzw. 40 und 70 M.-% RA getrennt durchgeführt. Für die Auswertung werden jeweils genannten Paare (für die gleiche Mischung und Temperatur) auf ihren Mittelwert normiert. Aus den relativen Emissionen werden über die Gruppen 0, 40 bzw. 70 M.-% RA Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Die Daten der Mischung mit dem Bindemittel

15/25 VL bei 120 °C wurden aus der Betrachtung entfernt, da die Werte die Streuung von 2σ überschreitet. Für den Vergleich von 0 und 40 M.-% RA ergeben sich für 0 M.-% RA $1,05\pm 0,05$ und für 40 M.-% RA $0,95\pm 0,05$. Für den Vergleich von 40 und 70 M.-% RA ergeben sich für 40 M.-% RA $1,12\pm 0,08$ und für 70 M.-% RA $0,88\pm 0,08$ (Bild 5-27). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die beobachtete Reduktion der Emissionen durch einen erhöhten Asphaltgranulatanteil im Mittel gering, aber signifikant ist. Der Unterschied von 0 zu 40 M.-% RA fällt etwas kleiner aus als der von 40 zu 70 M.-% RA. Diese Veränderungen können darauf zurückzuführen sein, dass, wie in den Vorversuchen beobachtet, besonders in den ersten Stunden der Heißverarbeitung von neuem bitumenhaltigen Bindemitteln die Emissionen am höchsten sind und sich nach einigen Stunden auf einem niedrigeren Niveau einpendeln. Da es sich bei Asphaltgranulat um ein wiederverwendetes Material handelt, das bereits heißverarbeitet wurde, und die Menge an Frischbitumen bei Einsatz von Asphaltgranulat reduziert ist, ist davon auszugehen, dass die hohen Emissionen hier in geringerem Maße auftreten. Darauf deuten auch die Vorversuche an Asphaltgranulat hin.

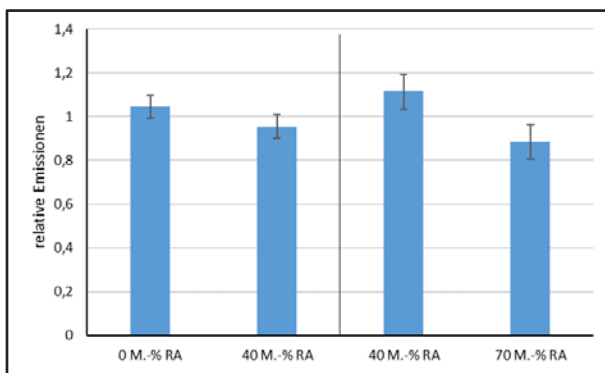


Bild 5-27: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Proben mit Asphaltgranulat. Links: Vergleich der Probengruppen 0 M.-% RA und 40 M.-% RA. Rechts: Vergleich der Probengruppen 40 M.-% RA und 70 M.-% RA. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

5.3.2 Variation von Zusätzen

Es wurden Versuche mit den Zusätzen D und E durchgeführt und mit den Ergebnissen der Messungen aus Phase I verglichen. Der Einsatz des Zusatzes E führt zu deutlichen Veränderungen bei den Versuchsbeobachtungen. Mischungen mit Zusatz E sind deutlich flüssiger und klebriger als Vergleichsmischungen, riechen auffällig und nach der Probenahme zeigt der Filter eine intensive Gelbfärbung. Durch die eingesetzten Zusätze zeigen sich nur geringe Veränderungen der Emissionen (Bild 5-28 - Bild 5-31).

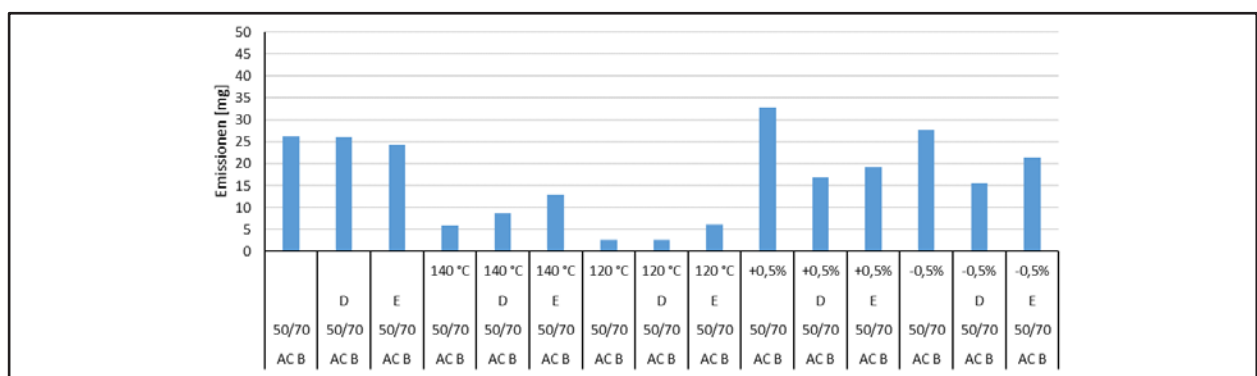


Bild 5-28: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt sind Messungen von Proben ohne Zusatz.

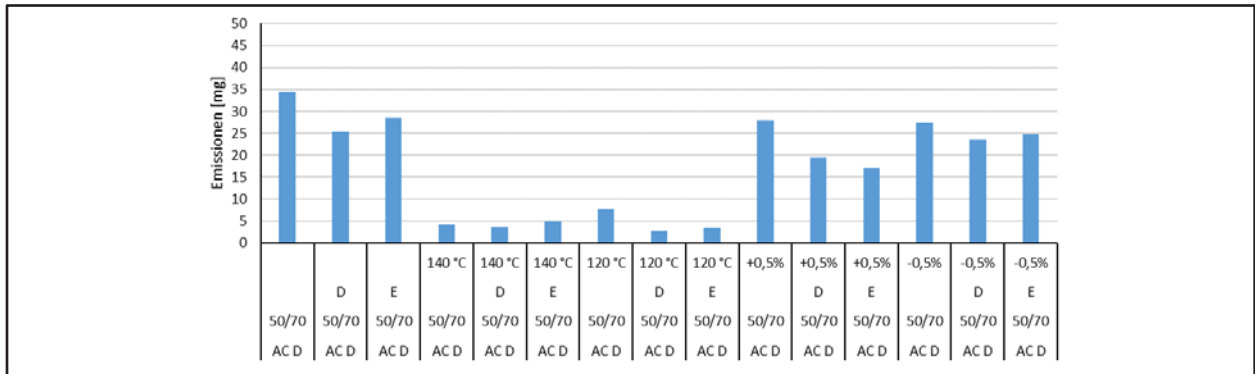


Bild 5-29: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt sind Messungen von Proben ohne Zusatz.

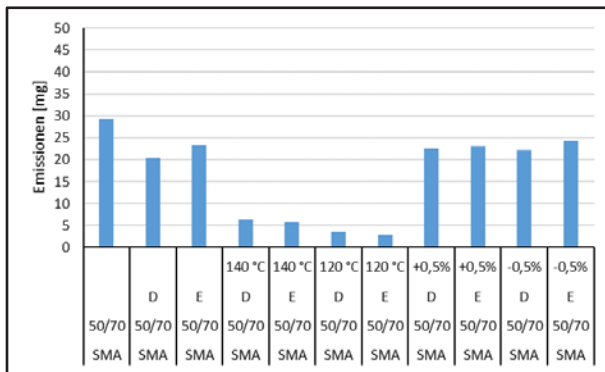


Bild 5-30: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten SMA mit dem Bindemittel 50/70 mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt sind Messungen von Proben ohne Zusatz.

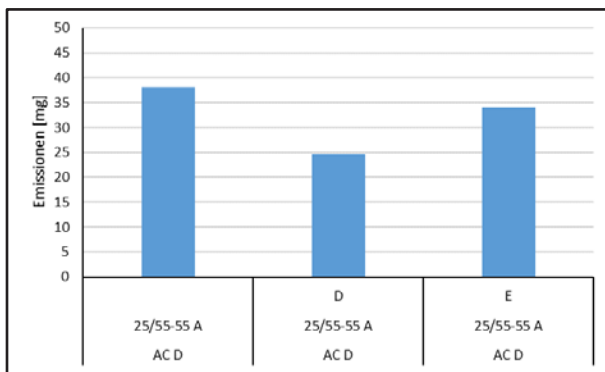


Bild 5-31: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55 A mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt ist eine Messung einer Probe ohne Zusatz.

Um eventuelle Unterschiede zu quantifizieren wurden die Daten zusätzlich rechnerisch ausgewertet. Hierzu wurden die zusammengehörigen Messwerte (Untersuchungsvarianten gleicher Asphaltart / -sorte mit gleichem Bindemittel, gleicher Bindemittelmenge und gleicher Temperatur in den Varianten ohne und mit Zusatz D bzw. E) auf ihren Mittelwert normiert. Aus relativen Emissionen wird der Mittelwert und die Standardabweichung über jeweils alle Proben der Gruppe ohne Zusatz, D und E berechnet. Für die Proben ohne Zusatz ergab sich ein Wert von $1,14 \pm 0,27$, für Zusatz D $0,82 \pm 0,12$ und für –Zusatz E $1,04 \pm 0,24$ (Bild 5-32). Betrachtet man die Werte und deren Standardabweichung, so ist kein Unterschied zwischen den Mischungen ohne Zusatz und den Proben mit Zusatz E festzustellen. Die Mischungen mit Zusatz D zeigen signifikant reduzierte Werte. Dieser Unterschied kann auf die Wirkungsweise des Zusatzes zurückzuführen sein. Nach den Angaben des Herstellers von Zusatz D, vernetzt der Zusatz Harz- und Asphaltbestandteile im Bitumen. Diese Vernetzung kann dazu führen, dass flüchtige Bestandteile chemisch an größere Moleküle gebunden werden, wodurch diese schwerer in die Gasphase übergehen können.

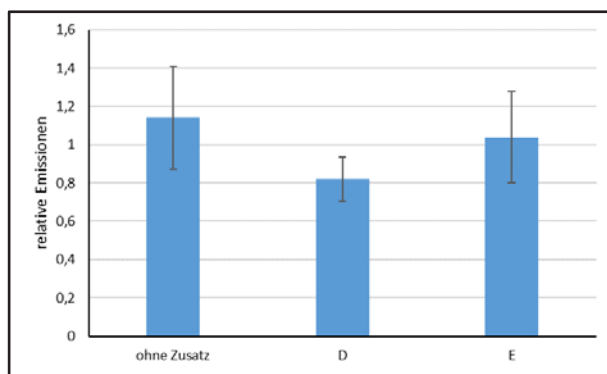


Bild 5-32: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Probengruppen ohne Zusatz, D und E. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

5.3.3 Zusammenfassung der gemeinsamen Betrachtung der Phase I und Phase II

Die Ergebnisse der in Phase I und Phase II untersuchten Asphalte und deren gemeinsame Betrachtung deuten bisher auf folgende Zusammenhänge an:

- Die Erhöhung des Anteils an Asphaltgranulat führt zu einer geringen Reduktion der Emissionen
- Der Einsatz von Zusätzen kann abhängig von deren Wirkungsweise zu einer systematischen Veränderung der Emissionen führen

6. Ausblick

Das hier für die Untersuchung von Asphalten im Labor entwickelte Verfahren kann dazu dienen, die verschiedenen Bitumen und bitumenhaltigen Bindemittel grundsätzlich hinsichtlich ihrer Emissionen einzuordnen. Es ist jedoch dringend geboten, die Laborergebnisse durch Messungen in situ zu untermauern.

Literatur

- [1] Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission
- [2] Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007/Fassung 2013 (TL Asphalt-StB 07/13). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013.
- [3] Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007/Fassung 2013 (ZTV Asphalt-StB 07/13). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013.
- [4] Erfahrungssammlung über die Verwendung von Fertigprodukten und Zusätzen zur Temperaturabsenkung von Asphalt (Stand: Juni 2017). Fachveröffentlichung der Bundesanstalt für Straßenwesen. 2017
- [5] Damm, K.-W., B. Bielenberg, M. Radenberg: Absenkung der Produktions- und Verarbeitungstemperatur von Asphalt durch Zugabe von Bitumenverflüssigern. Abschlussbericht zu FE 07.203/2002/CRB. <https://www.bast.de/DE/Publikationen/BerichteBAST/Fachveroeffentlichungen/Strassenbau/Downloads/s3-Absenkung-Produktions-Verarbeitungstemperatur-Asphalt-Bitumen-kurz.html> [1.9.2025]
- [6] Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt, Ausgabe 2011 (M TA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2011.
- [7] Empfehlungen für die Klassifizierung von viskositätsveränderten Bindemitteln, Ausgabe 2016 (E KvB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2016.
- [8] https://www.bgbau.de/fileadmin/user_upload/Hintergrund.pdf, März 2023.
- [9] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 09/2021, Durchführung von Erprobungsstrecken bei Baumaßnahmen an Bundesfernstraßen zum Einsatz von temperaturabgesenktem Walzasphalt in Verbindung mit Absaugeinrichtungen am Straßenfertiger. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Berlin, 2021.
- [10] Patrascu, Cosmin: Captache des fumées de bitume: Vers une évolution des finisseurs. Hygiène et sécurité de travail. No. 236, September 2014.
- [11] Messverfahren für Gefahrstoffe, BGIA 6305/2: Bitumen (Dämpfe und Aerosole, Bitumenkondensat-Standard). BGIA-Arbeitsmappe 40. Lfg. IV/08.
- [12] Messverfahren für Gefahrstoffe, BGIA 6305/1: Bitumen (Dämpfe und Aerosole, Mineralölstandard). BGIA-Arbeitsmappe 40. Lfg. IV/08.
- [13] Woitowitz, Hans-Joachim: Untersuchungen zum Gehalt von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) in Materialproben, laborexperimentell unter standardisierten Bedingungen erzeugten Emissionen sowie in Emissionen im Rahmen von Feldversuchen bei Verarbeitung verschiedener Bitumensorten unterschiedlicher Rohöl-Provenienzen bzw. Hersteller / Lieferanten. Entwurf des Schlussberichtes. Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft der Bitumenindustrie. 1997.
- [14] Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen, Ausgabe 2007/Fassung 2013 (TL Bitumen-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 794, Köln, 2013.
- [15] Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, Ausgabe 2009 (TL AG-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 749, Köln, 2009.
- [16] Hinweise für die Planung und Ausführung von Alternativen Asphaltbinderschichten, Ausgabe 2015 (H AI ABI). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 737, Köln, 2015.
- [17] DIN EN 13205:2014-09: Exposition am Arbeitsplatz — Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sammlern für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikel

- [18] DIN EN 689:2020-01: Messung der Exposition durch Einatmung chemischer Arbeitsstoffe – Strategie zur Überprüfung der Einhaltung von Arbeitsplatzgrenzwerten
- [19] DIN EN 482:2021-05: Exposition am Arbeitsplatz - Verfahren zur Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen - Grundlegende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit
- [20] Messverfahren zur Bestimmung von Kühlschmierstoffen und sonstigen komplexen Kohlenwasserstoffgemischen in der Luft (Messverfahren KSS und KKG (12/2014), IFA, Berlin, 2014.

Tabellen

- Tab. 1-1: Niedrigste und höchste Temperatur des Asphaltmischgutes in °C (Auszug aus Tabelle 3 TL Asphalt-StB 07/13).
- Tab. 3-1: Einbezogene Bindemittel und Kombinationen.
- Tab. 3-2: Untersuchungsvarianten der Untersuchungsphase I. Die Kürzel A, B und C stehen für die Bindemittel verschiedener Hersteller bzw. Raffinerien und geben an von welchen Herstellern entsprechende Bindemittel bezogen werden. Bei mit „o.“ getrennten Einträgen wird einer der genannten Hersteller ausgewählt.
- Tab. 3-3: Untersuchungsvarianten der Untersuchungsphase II. Die Kürzel A, B und C stehen für die Bindemittel verschiedener Hersteller bzw. Raffinerien und geben an von welchen Herstellern entsprechende Bindemittel bezogen werden. Bei mit „o.“ getrennten Einträgen wird einer der genannten Hersteller ausgewählt.
- Tab. 4-1: Bindemittelgehalte der verschiedenen Asphaltarten/-sorten.
- Tab. 4-2: Ergebnisse der Probenahme während des Abkühlens.
- Tab. 5-1: Messergebnisse für die Emissionen (Masse der Aerosole und Dämpfe in mg) für die Untersuchungsvarianten in Phase I.
- Tab. 5-2: Auflistung der Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Spannweiten der verschiedenen Asphaltarten.
- Tab. 5-3: Auflistung der niedrigsten, höchsten, Mittelwerte und der Spanne der Werte der verschiedenen Bitumenarten/-sorten. Es standen nur die Bindemittel 50/70, 70/100 und 25/55-55 A von allen Herstellern zur Verfügung.³⁸
- Tab. 5-4: Übersicht über die den Asphaltarten /-sorten der zugegebenen Bindemittelmengen mit Normierungsfaktor.
- Tab. 5-5: Vergleich der Emissionen von Asphaltmischungen mit Straßenbaubitumen 50/70 mit erwarteten Emissionen basierend auf den Werten des AC T und des Bitumengehaltes.
- Tab. 5-6: Messergebnisse für die Emissionen (Masse der Aerosole und Dämpfe in mg) für die Untersuchungsvarianten in Phase II. Vergleichsmessungen aus Phase I sind ebenfalls mit der Bezeichnung „+/-0 M.-%“ oder „160“ (kursiv) gelistet. Links: Variation des Bindemittelgehaltes. Rechts: Variation der Temperatur. Bei Einsatz der Zusätze D und E werden diese in Klammern in der Spalte „Bindemittel (Zusatz)“ erwähnt.

Bilder

Bild 1-1: Dämpfe und Aerosole bei der Verarbeitung von konventionellem (rot) und temperaturabgesenktem (grün) Walzasphalt im Freien.

Bild 4-1: Ausgewähltes Material, welches für die Prüfung von Aerosolen und Dämpfen bei der Verarbeitung von bitumenhaltigen Bindemitteln notwendig ist: a) Gesamtstaub-/Gas-Probenahmesystem, b) Glaskartusche mit Siebdeckeln zum Einsetzen des XAD-2 Adsorbers in das GGP, c) Extraktionsgefäß für Adsorber und Filter mit Tetrachlorethen, d) Infrarotspektrometer mit Küvette.

Bild 4-2: Modifizierter Labormischer (1, 2) mit Probenahmesystem (3-6).

Bild 4-3: Vorversuche über eine Dauer von 4 h mit je 4 einstündigen Probenahmen. Links: Versuche an Asphaltgranulat, Rechts: Versuche an AC D mit unterschiedlichen Bindemitteln und Temperaturen.

Bild 4-4: Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Messwerte anhand von Messungen an AC D mit den Bindemitteln 70/100 und 25/55-55 A in den ersten zwei Stunden der Verarbeitung mit je drei Wiederholungen. Die Zahlen an den Messwerten und Fehlerbalken geben die Standardabweichung der jeweiligen Messpunkte wieder.

Bild 4-5: Infrarotspektrum des Extraktes von AC D mit Bitumen 50/70 von Hersteller A, mit 1 h Probenahme bei 160 °C. Es sind im Auswertebereich von 3000 bis 2800 cm^{-1} vier Banden bei den Positionen 2958 cm^{-1} , 2927 cm^{-1} , 2872 cm^{-1} und 2856 cm^{-1} zu sehen.

Bild 4-6: Thermogravimetrische Messungen der Bitumen 25/35 VL und 25/55-55 A im Bereich 25 bis 200 °C.

Bild 5-1: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC T sortiert nach Bindemitteln.

Bild 5-2: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC T RA sortiert nach Bindemitteln.

Bild 5-3: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC B sortiert nach Bindemitteln.

Bild 5-4: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC D sortiert nach Bindemitteln.

Bild 5-5: Links: Infrarotspektrum des Extraktes eines AC D mit Bitumen 25/55-55 A von Hersteller C, welches repräsentativ für alle Spektren von 25/55-55 A und PmB 45/80 VL von Hersteller C ist. Rechts: Infrarotspektrum des Extraktes eines AC D mit Bitumen 25/35 VL von Hersteller C, welches repräsentativ für alle Spektren aller übrigen Bindemittel aller Hersteller ist.

Bild 5-6: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten SMA sortiert nach Bindemitteln.

Bild 5-7: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Straßenbaubitumen 50/70 sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Bild 5-8: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Straßenbaubitumen 70/100 sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Bild 5-9: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Bild 5-10: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem viskositätsveränderten Bitumen PmB 45/80 VL sortiert nach Asphaltart /-sorte.

Bild 5-11: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem viskositätsveränderten Bitumen 50/80 VL sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Bild 5-12: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den viskositätsveränderten Bitumen 15/25 VL, 25/35 VH und 25/35 VL sortiert nach Asphaltart / -sorte.

Bild 5-13: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC B und AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

Bild 5-14: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC T und SMA mit dem Bindemittel 50/70 mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).

- Bild 5-15: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 15/25 VL und 25/35 VL mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).
- Bild 5-16: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55 A mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).
- Bild 5-17: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 70/100 und PmB 45/80 VL mit +0,5 M.-% („+0,5%“) und -0,5 M.-% („-0,5%“) Bitumen. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I („+/-0%“).
- Bild 5-18: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Probengruppen +/-0 M.-%, +0,5 M.-% und -0,5 M.-%. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.
- Bild 5-19: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC B und AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.
- Bild 5-20: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC T und SMA mit dem Bindemittel 50/70 mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.
- Bild 5-21: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 15/25 VL und 25/35 VL mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.
- Bild 5-22: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55 A mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.

- Bild 5-23: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit den Bindemitteln 70/100 und PmB 45/80 VL mit einer Probenahmetemperatur von 140 bzw. 120 °C. Gegenübergestellt sind Messungen aus Phase I mit einer Probenahmetemperatur von 160 °C.
- Bild 5-24: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Probengruppen 160 °C, 140 °C und 120 °C. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.
- Bild 5-25: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 15/25 VL mit einer Asphaltgranulatanteil von 0 („AC T“), 40 („AC T RA“) bzw. 70 M.-% („AC T RA70%“).
- Bild 5-26: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 70/100 mit einer Asphaltgranulatanteil von 0 („AC T“), 40 („AC T RA“) bzw. 70 M.-% („AC T RA70%“).
- Bild 5-27: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Proben mit Asphaltgranulat. Links: Vergleich der Probengruppen 0 M.-% RA und 40 M.-% RA. Rechts: Vergleich der Probengruppen 40 M.-% RA und 70 M.-% RA. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.
- Bild 5-28: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt sind Messungen von Proben ohne Zusatz.
- Bild 5-29: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten AC D mit dem Bindemittel 50/70 mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt sind Messungen von Proben ohne Zusatz.
- Bild 5-30: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten SMA mit dem Bindemittel 50/70 mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt sind Messungen von Proben ohne Zusatz.
- Bild 5-31: Darstellung der freigesetzten Aerosol- und Dampf-Massen der Untersuchungsvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55 A mit den Zusätzen D und E. Gegenübergestellt ist eine Messung einer Probe ohne Zusatz.
- Bild 5-32: Darstellung der Mittelwerte der relativen Emissionen der Probengruppen ohne Zusatz, D und E. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

Anlage

**Arbeitsanleitung –
Laboruntersuchungen der
Dämpfe und Aerosole beim
Einbau von Asphalt**

Inhalt

1. Anwendungsbereich	80
2. Beschreibung des Verfahrens	80
3. Geräte und Prüfmittel	80
4. Proben.....	81
5. Durchführung.....	82
5.1 Vorbereitung	82
5.2 Probenahme	82
5.3 Probenaufarbeitung	83
5.4 Infrarotspektroskopie.....	83
5.5 Kalibriergerade.....	83
6. Berechnung und Angabe der Ergebnisse	84
7. Angaben im Prüfbericht.....	85

1. Anwendungsbereich

Das hier beschriebene Verfahren dient zu Bestimmung der Masse an freigesetzten Dämpfen und Aerosolen bei der Heißverarbeitung von Asphalt im Labor.

2. Beschreibung des Verfahrens

Das zu untersuchende Asphaltmischgut wird in einem Labormischer mit Absaugeinrichtung hergestellt und die frei werdenden Dämpfe und Aerosole mit einem Gesamtstaub- und Gas-Probenahmesystem mit Filter und Adsorber aufgefangen. Die Filter und Adsorber werden extrahiert und die Extrakte mittels Infrarotspektroskopie untersucht und quantifiziert.

3. Geräte und Prüfmittel

Für alle Prüfmittel, die mit der Probe in Kontakt kommen ist der Einfluss auf den Blindwert zu prüfen.

- Wärmekammer mit Luftumwälzung, regelbar bis zu einer Temperatur von mind. 250 °C
- Waage mit Ablesegenauigkeit von ± 1 g
- Waage mit Ablesegenauigkeit von $\pm 0,01$ g
- Labormischer für Asphalt (vgl. TP Asphalt, Teil 35 A, Abschnitt 3) mit Absaugeinrichtung (z.B. ein Rohr, welches an den Deckel des Mixers angebracht ist, mit Schlauchanschluss),.
- Thermometer, LST 0/360 (vorzugsweise DIN 12778)
- Stoppuhr
- Silikonschläuche, Temperaturstabil bis 160 °C (z.B. Innendurchmesser = 8 mm).
- Wasserfalle, mit zwei Schlauchanschlüssen.
- Gesamtstaub- und Gas-Probenahmesystem (GGP).
- Gasflussmessgerät.
- Selbstregulierende Pumpe.
- Glasfaserfilter, bindermittelfrei, \varnothing 37 mm.

- XAD-2 Adsorber, gereinigt mit Korngröße 0,5 bis 2 mm (neuer und/oder ungereinigter Adsorber kann mittels verschiedener Verfahren aufgereinigt werden. Ein mögliches Verfahren ist eine Soxhletextraktion mit Tetrachlorethen Die Reinheit ist vor der Versuchsdurchführung zu prüfen).
- Adsorberkartuschen mit Siebdeckeln.
- Kolbenhubpipetten, 0,1 bis 10 ml.
- Probengläser, Volumen mindestens 20 ml.
- Filtrierstand mit Trichter.
- Schwarzband Papierfilter.
- IR-Quarzglas-Küvetten, Dicke = 1 cm, Transparent im Wellenzahlbereich 2800-3000 cm^{-1} .
- Kühlschrank, Temperatur = 7 °C.
- Tetrachlorethen, geeignet für die Spektroskopie.
- Mineralöl, geeignet für die Spektroskopie.
- Infrarotspektrometer mit Küvettenhalter.

4. Proben

Es können die Emissionen von Asphalten bestimmt werden. Die Masse des Asphaltmischguts beträgt (6000 ± 10) g.

Für den Vergleich von Bindemitteln ist es ratsam für alle Proben Gesteinskörnungen gleichen Ursprungs und mineralogischer Zusammensetzung zu verwenden.

Die Proben können in einem Temperaturbereich von 120 bis 160 °C untersucht werden (andere Temperaturen sind möglich, wurden aber bei der Entwicklung des Verfahrens nicht betrachtet). Um eine bessere Umhüllung des Gesteins zu erreichen kann das Asphaltmischgut bei Temperaturen über der Probenahmetemperatur gemischt werden.

Es wird empfohlen eine Doppelbestimmung durchzuführen.

5. Durchführung

5.1 Vorbereitung

Das Probenahmesystem wird mit dem Labormischer verbunden. Hierzu ist die Absaugeinrichtung des Labormischers über einen Silikonschlauch mit der Wasserfalle und diese mit einem weiteren Silikonschlauch mit dem Gesamtstaub- und Gas-Probenahmesystem zu verbinden. Das Probenahmesystem wird über einen dritten Silikonschlauch mit der selbstregulierenden Pumpe verbunden. Die Pumpe wird auf einen Fluss von $(3,5 \pm 0,1)$ ml/min eingestellt. Es wird empfohlen einen Gasflussmesser zwischen Probenahmesystem und Pumpe einzubauen.

Die Komponenten Gestein, Asphaltgranulat und bitumenhaltiges Bindemittel werden auf die Starttemperatur in der Wärmekammer vortemperiert.

Die Adsorberkartusche wird mit $(2,60 \pm 0,05)$ g gereinigtem XAD-2 Adsorber gefüllt, verschlossen gelagert und unmittelbar vor der Messung zusammen mit einem Filter in das Gesamtstaub- und Gas-Probenahmesystem eingesetzt.

5.2 Probenahme

Das vortemperierte Gestein und Bindemittel, sowie Asphaltgranulat und Zusätze (z.B. Faserstoffe) werden im vortemperierten Mischer gemischt. Wird die Probe bei der Starttemperatur beprobt, startet das Durchmischen der Probe (z.B. 35 U/min) und die Probenahme unmittelbar nach Füllen des Mixers. Liegt die Probenahmetemperatur unterhalb der Starttemperatur, wird die Asphaltprobe für 3,0 min durchmischt und die Asphaltprobe auf die Probenahmetemperatur unter minimalem Durchmischen abgekühlt. Die Probenahme und das Durchmischen starten mit Erreichen der Zieltemperatur. Die Probe wird in beiden Fällen für 1,00 h bei einem Gasfluss von $(3,5 \pm 0,1)$ ml/min entnommen.

5.3 Probenaufarbeitung

Die Probenaufarbeitung sollte unmittelbar nach der Probenahme durchgeführt werden. Ist das nicht möglich müssen Filter und Adsorber luftdicht gelagert werden. Der Filter wird in ein Probenglas gegeben und der Adsorber aus der Kartusche quantitativ in dasselbe Probenglas überführt. Filter und Adsorber werden mit 10,0 ml Tetrachlorethen versetzt und vorsichtig geschüttelt. Das verschlossene Probenglas mit der Extraktionsmischung wird für mindestens 16 h im Kühlschrank bei 7 °C gelagert. Im Anschluss wird das Extraktionsgefäß auf Raumtemperatur erwärmt und die Extraktionslösung mit Trichter und Schwarzbandfilter abfiltriert.

5.4 Infrarotspektroskopie

Das Extrakt wird in eine Quarzglas-Küvette überführt und in das Infrarotspektrometer eingesetzt. Als Messparameter sind ein Messbereich von mindestens 2800 bis 3000 cm^{-1} , eine 16-fache Spektrenaddition und eine Auflösung von 4 cm^{-1} zu wählen. Überschreitet der Messwert den Kalibrationsbereich kann die Probe mit einem definierten Verdünnungsfaktor (z.B. 10) verdünnt werden.

Eine Untergrundkorrektur erfolgt durch Messung des reinen Tetrachlorethens.

5.5 Kalibriergerade

Für jede Charge an gereinigtem Adsorber wird eine Kalibriergerade erstellt. Diese sollte mindestens fünf Datenpunkte enthalten und deren Konzentrationen die Messgrenzen des Infrarotspektrometers berücksichtigen.

Mit Mineralöl und Tetrachlorethen werden Kalibrierlösungen unterschiedlicher Konzentrationen vorbereitet (z.B. im Konzentrationsbereich für Mineralöl von 10 bis 1000 mg/l). Für jede Kalibrierlösung wird in ein Probenglas (2,6±0,05) g des gereinigten XAD-2 Adsorbers und ein Glasfaserfilter gegeben. In jedes Probenglas werden 10,0 ml einer Kalibrierlösung gegeben, die Gläser verschlossen und für mindestens 16 h im Kühlschrank bei 7 °C gelagert. Nach der Extraktion werden die

Extraktionslösungen auf Raumtemperatur erwärmt, mit Trichter und Schwarzbandfilter abfiltriert und infrarotspektroskopisch untersucht (siehe Kapitel 5.4).

6. Berechnung und Angabe der Ergebnisse

Es wird die Konzentration der Kalibrierlösungen gegen integrierte Extinktion im Bereich 2800 bis 3000 cm^{-1} aufgetragen und mit einer Gerade folgenden Typs angepasst:

$$A = a \cdot c + b \quad [1]$$

mit: A : Integrierte Extinktion im Bereich 2800 bis 3000 cm^{-1} .
 a : Steigung der Kalibriergerade in ml/mg .
 c : Konzentration der Lösung.
 b : Achsenabschnitt der Kalibriergeraden.

Für die Proben wird die Extinktion des Infrarotspektrums im Bereich von 2800 bis 3000 cm^{-1} integriert und mittels der erstellten Kalibriergeraden auf eine Stoffmasse bezogen. Die Umrechnung von Mineralöl auf Bitumenkondensat erfolgt mittels eines Korrekturfaktors (1,4689) und eine eventuelle Verdünnung des Extraktes wird berücksichtigt.

$$m_{AD} = \frac{(A \cdot AT - b) \cdot 1,4689 \cdot 10 \text{ ml}}{a} \quad [2]$$

mit: m_{AD} : Masse Aerosol und Dampf in mg .
 A : Integrierte Extinktion im Bereich 2800 bis 3000 cm^{-1} .
 AT : Aliquoter Teil der Verdünnung.
 b : Achsenabschnitt der Kalibriergerade.
 a : Steigung der Kalibriergerade in ml/mg .

Das Ergebnis wird auf 0,1 mg gerundet angegeben.

7. Angaben im Prüfbericht

Im Prüfbericht müssen folgende Punkte enthalten sein:

- Bestimmte Masse an Dampf und Aerosol.
- Starttemperatur, Temperatur bei der Messung.
- Asphaltmischgutzusammensetzung
- Vorbehandlung / Vorbereitung der Baustoffe
- Mischdauer, Drehzahl, Mischer-Drehzahl
- Abweichungen von der Vorschrift.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Straßenwesen“

2024

S 203: Prognose der Wirtschaftlichkeit von Betonfahrbahndecken – Bauweisen RStO/RDO

Beckenbauer, Gebhardt, Riwe, Tschernack, Villaret

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

S 204: Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E

Moormann, Liebl, Schleeh

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

S 205: Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

Roos, Plachkova-Dzhurova, Schwarzmann

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

S 206: Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit

Neumann, Oeser, Reinhardt, Blasl, Canon Falla, Wellner, Kayser

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

2025

S 207: Optimierung der Kompositbauweise (Durchgehend bewehrte Betondecke mit dünner flexibler Deckschicht)

Freudenstein, Dirnhofer, Eger

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

S 208: Verifizierung der Mischgutkonzeptionierung kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschichten und Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen

Radenberg, Staschkiewicz, Vienenkötter, Mollenhauer, Winter

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

S 209: Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

Uday, Huber, Birle, Cudmani

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

S 210: Prüfung und Bewertung der Dauerhaftigkeit „zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV)“ im Unterbau von Verkehrsflächen

Zeni, Huber, Birle, Cudmani

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

S 211: Literaturstudie zur Nachhaltigkeit im Straßenbau

Carreño, Schmitz, Kemper, Cypra, Holldorb

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

S 212: Einfluss von temporär auftretendem Grundwasser auf die Standsicherheit von Straßeneinschnittsböschungen

Denne, Festag, Gattermann

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


S 213: Einfluss der Pendelbewegung der Fahrzeuge des Schwerverkehrs auf die Beanspruchung und Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen

Uhlig, Schlimper, Seeger, Zeißler, Wellner, Blasl, Kathmann, Scharrenbroich, Roggendorf, Haas

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

- S 214: Kritikalitätsanalyse für die Bundesverkehrswege als Baustein der Klimawirkungsanalyse**
 Burg, Franken, Gebhardt, Hewel, Schrempp
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 215: Erstellung eines Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung und zur Prognose des Verhaltens von Pflasterbefestigungen**
 Wellner, Zeißler, Spanier, Blasl
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 216: Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen**
 Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 217: Untersuchung zur Wirksamkeit der Ansprühmittel zwischen Asphaltschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes**
 Böhm, Middendorf, Kempf, Krause
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 218: Zur experimentellen Bestimmung der Wärmedehnzahl von Beton im Straßenbau**
 Spilker 20,50 €
- S 219: Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel**
 Renken, Lehmkuhl, Neumann, Liu, Ulrich
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 220: Neue Prüfverfahren und -parameter: Übertragung des Bewertungshintergrundes des Verformungswiderstandes von Walzasphalt für die vertragliche Anwendung von Performance-Anforderungen**
 Radenberg, Dominik, Nytus, Müller
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 221: Entwicklung von Asphaltschichten für Straßen und Brückenbeläge unter extremen Klimaeinwirkungen**
 Plachkova-Dzhurova, Heide-Dörr, Ulrich
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 222: Langfristige Schwermetalleinbindung in Böden und Ersatzbaustoffen durch Behandlung mit Bindemitteln**
 Lin
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 223: Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums**
 Radenberg, Breddemann, Holzwarth, Schmidt, Rudi, Stephan
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 224: Baupraktische Erprobung von Straßenbetonen mit Innenhydrophobierung**
 Weise, Fladt
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden
- S 225: Einflüsse auf die Konzentration der Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Walzasphalt**
 Wörner, Eickhoff, Patzak, Hilbig
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/>
 heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
 Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
 Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
 Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
 Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-887-4
<https://doi.org/10.60850/bericht-s225>

www.bast.de