
Untersuchung zur Wirksamkeit der Anstrichmittel zwischen Asphaltschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungs- gerechten Schichtenverbundes

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 217

Untersuchung zur Wirksamkeit der Ansprühmittel zwischen Asphaltschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungs- gerechten Schichtenverbundes

von

Stefan Böhm (Projektleitung), Moritz Middendorf, David Kempf
Technische Universität Darmstadt – Institut für Straßenwesen

Jens Krause
Esha Straße GmbH, Laucha

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 07.0285
Untersuchung zur Wirksamkeit der Anstrichmittel zwischen Asphalt-schichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes

Fachbetreuung:
Sezgin Köse

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 978-3-95606-849-2 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s217>

Bergisch Gladbach, April 2025

Kurzfassung–Abstract

Untersuchung zur Wirksamkeit der Ansprühmittel zwischen Asphaltsschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes

Der dauerhafte Verbund einzelner Asphaltsschichten ist eine wesentliche Voraussetzung für eine lange Nutzungsdauer von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Zur Herstellung eines ausreichenden Verbundes ist die Verwendung von Ansprühmittel notwendig. Das technische Regelwerk enthält hierfür entsprechende Empfehlungen zur Dosierung der Ansprühmittel je nach Art und Beschaffenheit der Unterlage. Die Festlegungen dazu basieren weitestgehend auf empirischen Erkenntnissen und auf Laboruntersuchungen, die in der Praxis nicht evaluiert worden sind.

In der Baupraxis wurde inzwischen festgestellt, dass in einigen Fällen die Anforderungen an den Schichtenverbund trotz Verwendung von ausreichendem Ansprühmittel nicht erreicht werden. Hier sind die Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen dem Ansprühmittel nach Art und Menge einerseits und der Beschaffenheit der Unterlage (gefräst oder nicht gefräst), deren Temperatur, der Art der einzubauenden Schicht und des Wetters andererseits unzureichend.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist eine systematische Untersuchung des Einflusses der Applikation von Ansprühmittel auf die Güte des Schichtenverbundes der so zu verbindenden Asphaltsschichten. Dabei soll neben der Art auch die Dicke des Ansprühmittels variiert werden und sowie die Art der Oberflächenvorbereitung. Basierend auf diesen Untersuchungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen sollen allgemeingültige Empfehlungen formuliert werden, die den Einsatz von Ansprühmittel und dessen Einfluss auf den Schichtenverbund charakterisieren.

In einem ersten Schritt werden mithilfe einer nationalen und internationalen Literaturstudie die Grundlagen der verschiedenen Bereiche von Ansprühmittel und Schichtenverbund im Straßenbau erläutern. Durch die Darstellung bisheriger Erkenntnisse und Versuche des Einflusses von Ansprühmittel auf den Schichtenverbund wird festgestellt, welche Anforderungen an die Verwendung von Ansprühmittel im Straßenbau bestehen. Neben den Erkenntnissen zum Einfluss des Ansprühmittels wird aufgezeigt, welchen Einfluss der Schichtenverbund auf die Lebensdauer einer Asphaltbefestigung besitzt.

Für die Analyse der Anwendung von Ansprühmitteln wurde diese zum einen in einem Laborversuch und zum anderen in Baumaßnahmen in situ untersucht. Für die Laborsimulation wurde von dem Projektpartner (Firma Esha Straße GmbH) eine Ansprühanlage hergestellt, wodurch Probekörper realitätsnah mit dem Ansprühmittel appliziert werden konnten. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei einer sorgfältigen Anwendung des Ansprühmittels der Schichtenverbund sehr gut ist.

Gleiches haben die Ergebnisse aus den Baumaßnahmen gezeigt. Hierbei konnte außerdem beobachtet werden, dass bei einer falschen Anwendung oder dem Einfluss von Schmutz oder Wasser der Schichtenverbund beschädigt wird. Aus diesem Grund empfiehlt es sich die Unterlage ausreichend zu reinigen und den Einbau nur bei trockenen Bedingungen durchzuführen.

Anhand der Erkenntnisse wurden für die verschiedenen Varianten Ansprühmengen empfohlen.

Investigation of the effectiveness of the spraying agents between asphalt layers and courses to achieve a layer bonding that meets the requirements

The durable bonding of individual asphalt layers is an essential prerequisite for a long service life of asphalt pavements. The use of spraying agents is necessary to achieve a sufficient bond. The technical rules and regulations contain recommendations on the dosage of the spray agent depending on the type and condition of the base. The specifications are largely based on empirical findings and laboratory tests that have not been evaluated in practice.

In the meantime, it has been found in construction practice that in some cases the requirements for the layer bond are not achieved despite the use of sufficient primer. In this case, there is insufficient knowledge about the interaction between the type and quantity of the spraying agent on the one hand and the condition of the base (milled or not milled), its temperature, the type of layer to be paved and the weather on the other hand.

In a first step, a national and international literature study will be used to explain the fundamentals of the various areas of spray and layer bonding in road construction. By presenting previous findings and tests of the influence of spray on the layer bonding, the requirements for the use of spray in road construction will be determined. In addition to the findings on the influence of the spray, the influence of the layer bond on the service life of an asphalt pavement will be shown.

For the analysis of the application of sprayed-on agents, this was investigated in a laboratory test on the one hand and in construction measures in situ on the other. For the laboratory simulation, the project partner (Esha Straße GmbH) produced a spraying system, which allowed test specimens to be realistically applied with the spraying agent. The results showed that, with careful application of the spray, the bond between the layers is very good.

The same was shown by the results from the construction measures. It was also observed that the layer bonding is damaged by incorrect application or the influence of dirt or water. For this reason, it is recommended to clean the base sufficiently and to carry out the paving only under dry conditions.

On the basis of the findings, the recommended application rates for the different variants were determined.

Summary

Investigation of the effectiveness of the spraying agents between asphalt layers and courses to achieve a layer bonding that meets the requirements

Guideline conform layer bonding can be reached due to influences out of interlocking and gluing. The gluing is enhanced by spraying the base layer with a spraying agent. Spraying is carried out either manually or automatically. Usually, cationic spraying agents consisting out of water, bitumen and further additives are being sprayed in the road construction. Depending on the emulsion, different additives are being used, that impact spraying and breaking behavior of the emulsion. The emulsions C40BF5-S and C60BP4-S are mainly used in Germany. At present, however, there are no exact specifications as to which emulsion is to be used for which application. For construction of a layer bonding, ranges of the amount of spraying agents are suggested which are depending on the base layer to spray.

In construction practice it has been found out, that the requirements of the layer bonding could not be fulfilled although a sufficient amount of spraying agent was used. The knowledge of the interactions between the quantity and kind of spraying agent and the circumstances like condition of the base layer, temperature and layer to build is insufficient.

The aim of this research project is therefore to systematically investigate the influence of the application of the spraying agent on the quality of the layer bonding of the asphalt layers to be bonded. Type, thickness of the spraying agent and the preparation of the surface shall be varied. Based on these investigations and the knowledge gained from them, generally applicable recommendations for the use of spraying agent and its influence on the layer bonding are to be formulated.

For investigating the spraying agents, laboratory tests on test specimens as well as tests in constructions projects with varying amounts of spraying agent were carried out.

The first step in the laboratory was to spray and build over asphalt slabs that were obtained out of a milled surface in the practice and have been constructed in the laboratory with a roller-sector-compact. The overbuilding of these slabs was also done with the roller-sector-compact. Drill cores were taken from these test specimens and the shear test according to Leutner (TP Asphalt-StB Teil 81) is performed to characterize the layer bonding.

Also, some slabs have been measured with a 3D surface camera before and after the spraying process. With this test the distribution of the emulsion over the surface can be determined.

To characterize the bitumen emulsions, the recovered bitumen was tested with bitumen tests (Softening point, dynamic shear rheometer, penetration).

The spraying of the tiles in the laboratory was done with a new developed spray equipment. This equipment enables the user to spray different amounts of bitumen emulsion and thus simulate a real spraying process. The spraying system was built by the Esha company, that was a partner in this research project. The equipment can be seen in figure 1.



Figure 1: Spraying plant for application of bitumen emulsion

The results of the laboratory test have shown that the distribution of the emulsion over the surface is uneven. Thus, the distribution of the emulsion over milled surfaces was measured with the 3D surface camera. This showed that the bitumen emulsions gather in the valleys of the milled surface because of their viscosity.

Also the results showed that the bitumen from the emulsion C60BP4-S is stiffer than from the emulsion C40BF5-S.

On the basis of the shear test according to Leutner, it could be determined that for both emulsions the medium amount of emulsion in a range of 300 g/m² achieved lesser shear values compared with high or low amounts of emulsion (see figure 2).

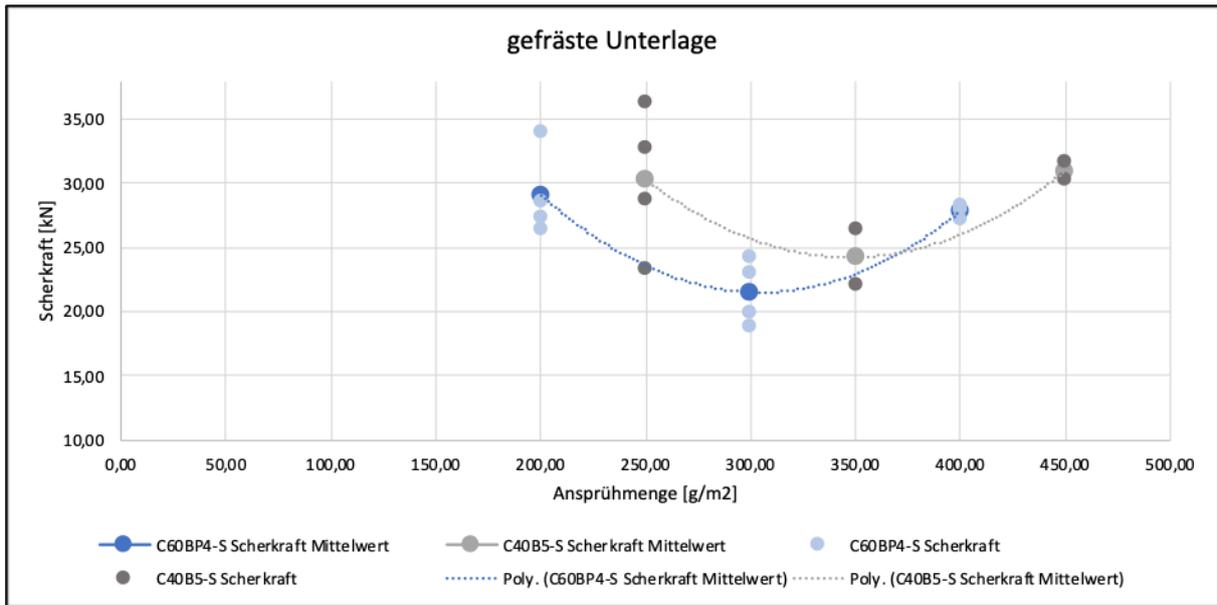


Figure 2: Shear forces for a milled surface for different amounts of spraying agent

In the next step, the results of the laboratory test have to be verified with results in practice. For that, the spray amounts got investigated in construction projects in different federal states in Germany by varying the base layer to spray, the asphalt layer and the asphalt mixture. The test sections were accompanied by the research team from the milling process to the pavement process of the new asphalt layers. The variations are

- New binder course on milled base course
- New surface course on newly paved binder course
- New surface course on milled base course

The results of the analysis of the cores taken from the construction process show that the shear force complies with the requirements of the ZTV Asphalt-StB. The results are shown in the following figures.

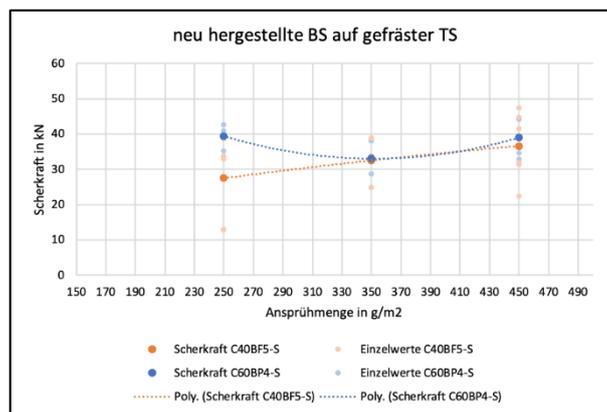


Figure 3: Shear forces for new binder layers on milled base layers

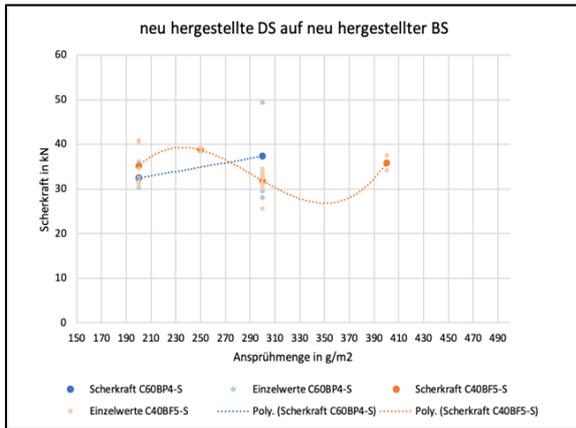


Figure 4: Shear forces for new surface layers on new constructed binder layers

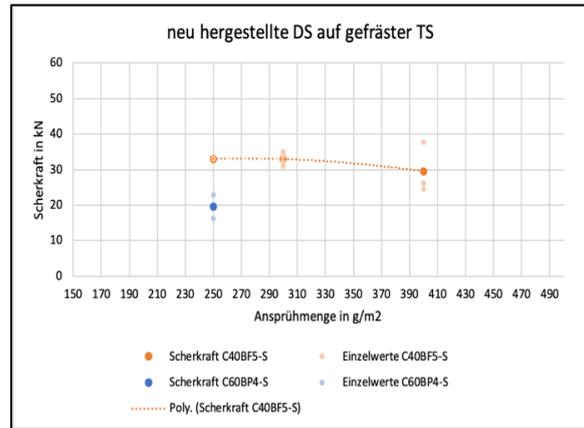


Figure 5: Shear forces for new surface layers on milled base layers

In conclusion, it can be stated out that the application of spraying agents is positive for the layer bonding. However, it is important to use the spraying agents only in compliance with certain conditions. A milled base layer needs different amount of spraying agent than a newly constructed base layer. The base layer also has to be completely dry and cleaned. The spraying process must not take place in rainy or wet conditions. In the following tables recommendations are shown which amount of spraying agent are suitable for different conditions (type and condition of base layer or layer to pave). The recommendations are shown for the emulsions C60BP4-S and C40BF5-S.

Table 1: Recommendation for the amount of the bitumen emulsion C 40 BF5-S

Art und Beschaffenheit der Unterlage	Aufzubringende Schicht	
	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht
	C40 BF5-S in g/m ²	
neu hergestellt	k.a.	250 bis 400
gefräst	350 bis 450	250 bis 400

Table 1: Recommendation for the amount of the bitumen emulsion C 60 BP4-S

Art und Beschaffenheit der Unterlage	Aufzubringende Schicht	
	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht
	C60 BP4-S in g/m ²	
neu hergestellt	k.a.	200 bis 300
gefräst	250 bis 450	200 bis 350

In the future, it will be necessary to conduct even more research into the exact influences on the layer composite of bonding and interlocking. It may be useful to adjust the properties of the emulsion in such a way that the flowing of the emulsion observed in the laboratory can be prevented. In the future, attention should also be paid to the effect that temperature-reduced asphalt may have on the layer bonding. Finally, the role of asphalt composition on the layer bond should be considered in more detail in the future.

Inhalt

Abkürzungen	12
1 Einführung	13
1.1 Aufgabenstellung	13
1.2 Vorgehensweise	13
1.3 Stand der Wissenschaft und Technik	14
1.3.1 Theorie des Schichtenverbund	14
1.3.2 Einflüsse des Schichtenverbundes	15
1.3.3 Versagensmechanismus und deren Auswirkungen auf die Lebensdauer	
1.3.4 Auswirkung von Anstrichmittel auf den Schichtenverbund	21
1.3.5 Historische Entwicklung von Anstrichmittel	23
1.3.6 Zusammensetzung von Anstrichmittel	24
1.3.7 Herstellverfahren von Anstrichmittel	25
1.3.8 Brechverhalten von Anstrichmittel	35
1.3.9 Applikation von Anstrichmittel	36
2 Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen	29
2.1 Untersuchungsmethodik	29
2.2 Probenkörperbeschaffung und Herstellung	30
2.2.1 Beschaffung von Asphaltprobekörpern	30
2.2.2 Herstellung von Asphaltplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät	31
2.3 Festlegung der Präparationsvarianten der Unterlagenoberfläche	35
2.4 Erfassung der Oberflächentextur	35
2.5 Anstrichen der Oberfläche	
2.5.1 Auswahl Bitumenemulsion	37
2.5.2 Anstrichen der Probekörper	39
2.5.3 Anstrichmengen und -art	42
2.6 Untersuchung der Probekörper	43
2.6.1 Abscherversuch nach Leutner	43
2.6.2 Untersuchungen am Bitumen	43

3	Ergebnisse der Laborversuche	45
3.1	Verteilung der Bitumenemulsion	45
3.2	Ansprühmenge	48
3.3	Ergebnisse Abscherversuch nach Leutner	49
3.4	Ergebnisse der Bitumenversuche	53
3.4.1	Ergebnisse der Standardversuche	53
3.4.2	Ergebnisse der Untersuchungen im DSR (Temp-Sweep)	53
4	Einsatz von unterschiedlichen Ansprühmengen in Versuchsstrecken	57
4.1	Definition der Varianten	57
4.2	Versuchsstrecken	59
4.2.1	Fürfeld B 420; Rheinland-Pfalz	60
4.2.2	Umgehung Alsenz B 48; Rheinland-Pfalz	62
4.2.3	Bad Urach-Grabenstetten L 211; Baden-Württemberg	63
4.2.4	Münchweiler B 10; Rheinland-Pfalz	64
4.2.5	Künzelsau B 19; Baden-Württemberg	67
5	Untersuchungen an den Versuchsstrecken	68
5.1	Baustellenbegleitung	68
5.2	Bohrkernentnahme und Bohrkernuntersuchung	68
5.3	Messungen mit dem Falling Weight Deflector (FWD)	68
5.3.1	Auswertung der FWD-Daten	69
5.3.2	Durchführung der FWD-Messung	71
6	Ergebnisse der Baumaßnahmen	72
6.1	Ergebnisse Einbautemperaturen	72
6.1.1	Ergebnisse Temperatur der Unterlage	73
6.1.2	Ergebnisse Temperatur Mischgut	75
6.2	Ergebnisse Abscherversuch nach Leutner	78
6.3	Ergebnisse Tragfähigkeit (FWD-Messung)	84
7	Auswertung	87
7.1	Einfluss der Anstrichmittel auf den Schichtenverbund	87

7.2	Einfluss der Unterlage	90
7.3	Einfluss der Temperatur	92
8	Schlussfolgerung und Empfehlungen für die Anwendung	93
8.1	Empfehlung für den Einsatz von Ansprühmittel	93
8.2	Empfehlung für die Ansprühmenge	94
9	Forschungsbedarf	99
	Literatur	100
	Bilder	103
	Tabellen	106
	Anhang	107
A.1	Einsatz von Kalkmilch	107
A.2	Messdaten	110

Abkürzungen

AC - Asphaltbeton
Bk - Belastungsklasse
C40 B5-S - Bitumenemulsion mit weniger als 3 % Fluxmittel
C40 BF5-S - Bitumenemulsion mit mehr als 3 % Fluxmittel
C60 BP4-S - polymermodifizierte Bitumenemulsion
DAV - Deutscher Asphaltverband
DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.
DSR - Dynamischen Scherrheometer
FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FWD - Falling Weight Deflector
RStO - Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SMA - Splittmastix
TL - Technische Lieferbedingung
TP - Technische Prüfvorschrift
ZTV - Zusätzliche technische Vertragsbedingung

°C - Grad Celsius
cm - Zentimeter
cm-1 - Wellenzahl
g - Gramm
h - Stunde
Hz - Hertz
kN - Kilonewton
 $M_1 h^3$ - Charakteristische Steifigkeit der Platte
 M_0 - Schichtmodul des Halbraumes
m - Meter
M.-% - Masseprozent
 m^2 - Quadratmetern
 m^3 - Kubikmeter
min - Minute
mm - Millimeter
 mm^2 - Quadratmillimeter
N - Newton
Pa - Pascal
s - Sekunde

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Der dauerhafte Verbund einzelner Asphaltsschichten ist eine wesentliche Voraussetzung für eine lange Nutzungsdauer von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Zur Herstellung eines ausreichenden Verbundes ist die Verwendung von Anstrühmittel notwendig. Das technische Regelwerk enthält hierfür entsprechende Empfehlungen zur Dosierung der Anstrühmittel je nach Art und Beschaffenheit der Unterlage. Die Festlegungen dazu basieren weitestgehend auf empirischen Erkenntnissen und auf Laboruntersuchungen, die in der Praxis nicht evaluiert worden sind.

In der Baupraxis wurde inzwischen festgestellt, dass in einigen Fällen die Anforderungen an den Schichtenverbund trotz Verwendung von vorgegebenen Anstrühmittel nicht erreicht werden. Hier sind die Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen dem Anstrühmittel nach Art und Menge einerseits und der Beschaffenheit der Unterlage (gefräst oder nicht gefräst), deren Temperatur, der Art der einzubauenden Schicht und des Wetters andererseits unzureichend.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist eine systematische Untersuchung des Einflusses der Applikation von Anstrühmittel auf die Güte des Schichtenverbundes der so zu verbindenden Asphaltsschichten. Dabei soll neben der Art auch die Dicke des Anstrühmittels variiert werden und sowie die Art der Oberflächenvorbereitung. Basierend auf diesen Untersuchungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen sollen allgemeingültige Empfehlungen formuliert werden, die den Einsatz von Anstrühmittel und dessen Einfluss auf den Schichtenverbund charakterisieren

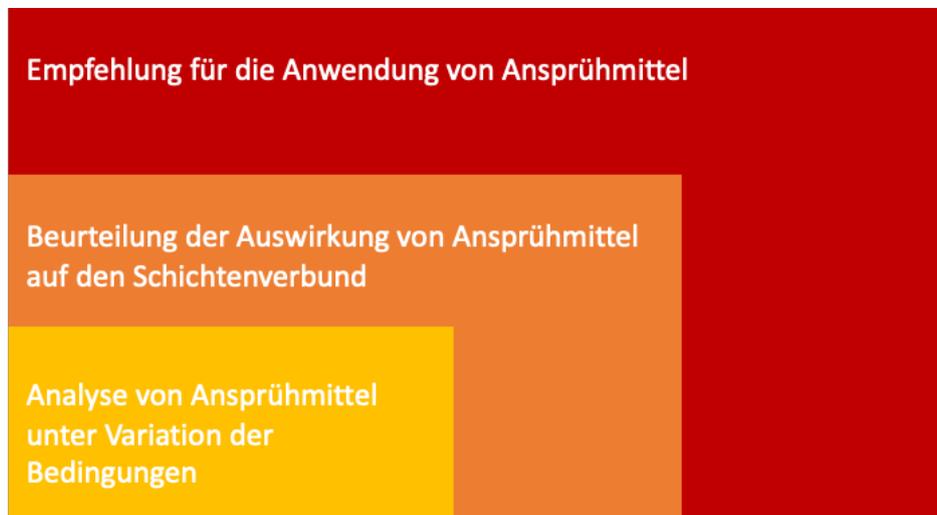


Bild 1: Darstellung der Ziele im Rahmen des Forschungsvorhabens

1.2 Vorgehensweise

Zunächst werden mittels Literaturstudie die Grundlagen von Anstrühmitteln und Schichtenverbund im Straßenbau erläutert. Durch die Darstellung bisheriger Erkenntnisse zum Einfluss von Anstrühmittel auf den Schichtenverbund wird festgestellt, welche Anforderungen an die Verwendung von Anstrühmittel im Straßenbau bestehen.

Basierend darauf wird eine Untersuchungsmethodik entwickelt. Die Untersuchungsmethodik soll in zwei Phasen unterteilt und nacheinander durchgeführt werden. In der ersten Phase sollen zwei verschiedene Ansprühmittel (ggf. eine dritte Sonderemulsion) im Labor untersucht werden. Dabei werden Platten mit unterschiedlichen Mengen Ansprühmittel besprüht und mit einem weiteren Asphaltbelag überbaut. Aus den hergestellten Asphaltpaketen sollen Bohrkerne für die Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner gezogen werden. Durch dieses Prüfverfahren sollen erste Erkenntnisse des Einflusses der Ansprühmenge auf die Schichtenverbundgüte festgestellt werden.

In der zweiten Phase der Untersuchungsmethodik sollen die gewonnenen Erkenntnisse der Laborversuche durch Versuchsstrecken in verschiedenen Bundesländern im realen Bauprozess überprüft werden. Die Versuchsstrecken sollen mit den empfohlenen Ansprühmengen aus den Laborversuchen hergestellt werden. Zur Überprüfung des Einflusses der Oberflächentextur gliedern sich die Versuchsstrecken in unterschiedliche Abschnitte mit unterschiedlichen Oberflächen auf. Hierdurch soll der Einfluss der Oberfläche von unterschiedlichen Asphaltbefestigungen überprüft werden. Das Ansprühen der Emulsion und der Einbau der neuen Asphaltsschicht sollen mit dem herkömmlichen Verfahren erfolgen. Aus den Versuchsstrecken sollen Bohrkerne gezogen werden und an diesen die Qualität des Schichtenverbundes überprüft werden. Zur Beobachtung des Tragverhaltens werden Untersuchungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD) durchgeführt. Zur Feststellung der Zusammensetzung und der Hohlraumverteilung werden asphalttechnologische Untersuchungen an Bohrkernen durchgeführt.

Abschließend wird das gesamte Projekt von der Herstellung der Prüfkörper im Labor bis zur Auswertung des Tragverhaltens der Asphaltbefestigung ausgewertet und es werden Empfehlungen für die Anwendung von Ansprühmittel formuliert.

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Literaturstudie dargelegt. Hierbei bezieht sich diese auf der einen Seite auf ähnliche Forschungsvorhaben, d.h. es wird dargelegt, inwiefern die Qualität des Schichtenverbunds Einfluss auf die Gesamtlebensdauer der Verkehrsflächenbefestigung hat. Auf der anderen Seite soll erarbeitet werden, wie die Menge und Art des Ansprühmittels den Schichtenverbund beeinflusst und welche Erkenntnisse hier bereits nationalen und internationalen erforscht wurden. Hierbei soll ein Hauptaugenmerk auf die Präparation der anzusprühenden Befestigung, d.h. inwiefern die Textur Einfluss auf das Haftverhalten hat, gelegt werden.

1.3.1 Theorie des Schichtenverbund

Verkehrsflächenbefestigungen werden in der Regel mehrlagig eingebaut. Der Oberbau einer Verkehrsflächenbefestigung lässt sich im Regelfall in Asphaltdeckschicht, -binderschicht und Asphalttragschicht unterteilen. Aufgrund der Einbaubedingungen entsteht zwischen jeweils zwei Schichten ein Übergangsbereich. Der im Übergangsbereich herrschende Schichtenverbund ist die Verbindung zwischen den einzelnen Schichten und soll einen Übertrag von Normal- und Schubspannung sicherstellen und dadurch eine vollständige Tragwirkung erzielen. Bei vollem Schichtenverbund fungieren zwei benachbarte Schichten als vollständige Einheit und es resultiert dadurch keinerlei Schichtengrenzverschiebung.

Mit der Literaturstudie zum Schichtenverbund soll aufgezeigt werden, inwiefern der Schichtenverbund das Tragverhalten einer Verkehrsflächenbefestigung beeinflussen kann und welche Auswirkung dadurch auf die Lebensdauer einer Verkehrsflächenbefestigung resultieren. Hierzu werden zuerst die Einflüsse, die für die Qualität des Schichtenverbundes verantwortlich sind, aufgezeigt. Anschließend werden die unterschiedlichen Versagensmechanismen des Schichtenverbundes dargestellt. Zuletzt werden Erkenntnisse aus nationalen und internationalen Forschungsvorhaben dargelegt, die sich mit der Thematik befassen, inwiefern die Qualität des Schichtenverbundes einen Einfluss auf die Gesamtlebensdauer einer Verkehrsflächenbefestigung hat und in welchem Abschnitt der Lebensdauer sich ein solcher Mangel bemerkbar macht.

1.3.2 Einflüsse des Schichtenverbundes

Ein anforderungsgerechter Verbund zwischen einzelnen Asphaltsschichten ist abhängig von Verzahnungen und Verklebungen sowie der Reibung. Durch einen vollständigen und dauerhaften Schichtenverbund soll die Bewegung zwischen den einzelnen Schichten durch Beanspruchungen aus Verkehr und Klima verhindert werden und somit ermöglichen, dass die Asphaltbefestigung als Ganzes den Beanspruchungen widersteht und die Belastung für die tieferliegenden Schichten sowie des Untergrundes reduziert wird (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2017).

Eine gute Verzahnung ist vorhanden, wenn die Gesteinskörnung der oberen Schicht in die untere Schicht eindringen. Das Einbauverfahren „heiß auf heiß“ ermöglicht in der Regel eine hohe Verzahnung, da bei diesem Verfahren die beiden Asphaltsschichten unmittelbar nacheinander hergestellt und gemeinsam in einem Arbeitsschritt verdichtet werden. Bei dem Einbauverfahren „heiß auf kalt“ wird eine weniger stark ausgeprägte Verzahnung erreicht. Dies führt zu einem geringeren Schichtenverbund (Wistuba & Walther, 2013).

Ein weiterer Faktor für einen hohen Schichtenverbund ist neben der Verzahnung die Verklebung. Die Verklebung wird durch das Aufbringen eines Vorspritzmittels erzielt und ist von einigen Faktoren abhängig. Es muss gewährleistet sein, dass keine Fremdstoffe wie Schmutz, Wasser oder andere Störstoffe das Verkleben verhindern. Die Güte der Verklebung wird dabei zum einen durch die Einbautemperatur und zum anderen durch die eingesetzte Menge an Vorspritzmittel beeinflusst (Stöckert, 2002).

In einigen Forschungsarbeiten wird neben der Verzahnung und der Verklebung ein weiterer Faktor für den Schichtenverbund genannt (Renken & Lobach, 2004) (Wistuba & Wellner, 2016). Die Reibung wirkt durch den direkten Korn-zu-Korn-Kontakt zwischen den Gesteinskörnern im Schichtwechsel. Einen Einfluss auf die Reibung haben die Bindemittelmenge auf den Kornoberflächen der Schicht und die Mengen an Vorspritzmittel. Eine zu hohe Bindemittelmenge sowie große Menge an Vorspritzmittel reduzieren die Reibung, da es hierbei zu einer Minimierung der Fläche von Korn-zu-Korn-Kontakt kommt (Renken & Lobach, 2004).

HOLL [1976] stellte fest, dass ein idealer Schichtenverbund vorhanden ist, wenn keine Inhomogenität in den inneren Strukturen des Schichtenverbundes auftritt (siehe Bild 2). Nach HOLL lässt sich ein idealer Verbund durch die Einbauweise „heiß auf heiß“ erzielen, da bei dieser Kombination die Bitumenfilme die richtige Dicke aufweisen und unmittelbar miteinander verschmelzen. Bei allen Kombinationen von „frisch auf alt“ lässt sich diese Verschmelzung nicht erreichen, da davon auszugehen ist, dass der Oberflächenfilm der alten Unterlage nicht für eine

Verklebung ausreicht. Hier empfiehlt HOLL den Einsatz von zusätzlichem Bindemittel, welches auf die kalte Unterlage aufgespritzt wird.

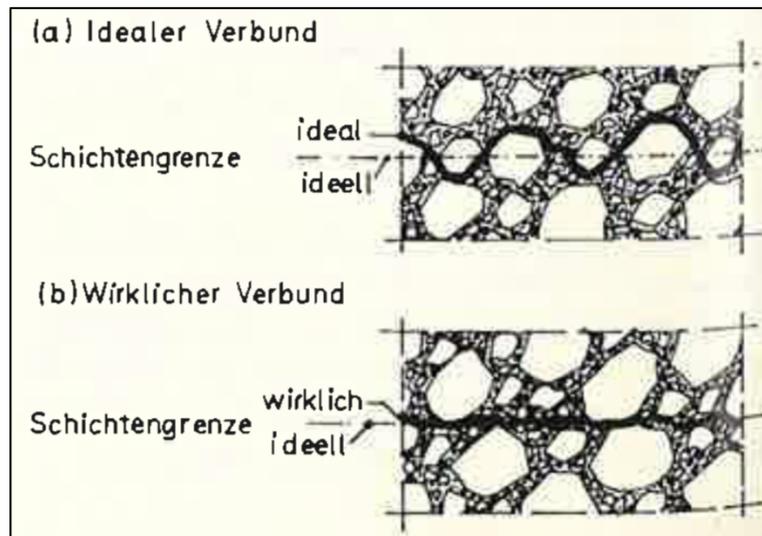


Bild 2: Unterschied zwischen idealem und wirklichem Verbund (Holl, 1976)

STÖCKERT [2002] unterteilt die Einflussgrößen auf den Schichtenverbund in vier Gruppen. Bild 3 stellt die Einflüsse auf den Schichtenverbund grafisch dar und verdeutlicht die Vielzahl der Einflussfaktoren. Die Gruppen „Asphaltkenngrößen“, „Einbaubedingungen“ und „Oberflächenzustand der zu überbauenden Schicht“ werden als Einflussfaktor bedingt durch den Herstellungsprozess eingeordnet. Die Einflüsse infolge des Verkehrs durch die Verkehrsbelastung werden gesondert betrachtet, da diese Einflüsse einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung des Schichtenverbundes haben.

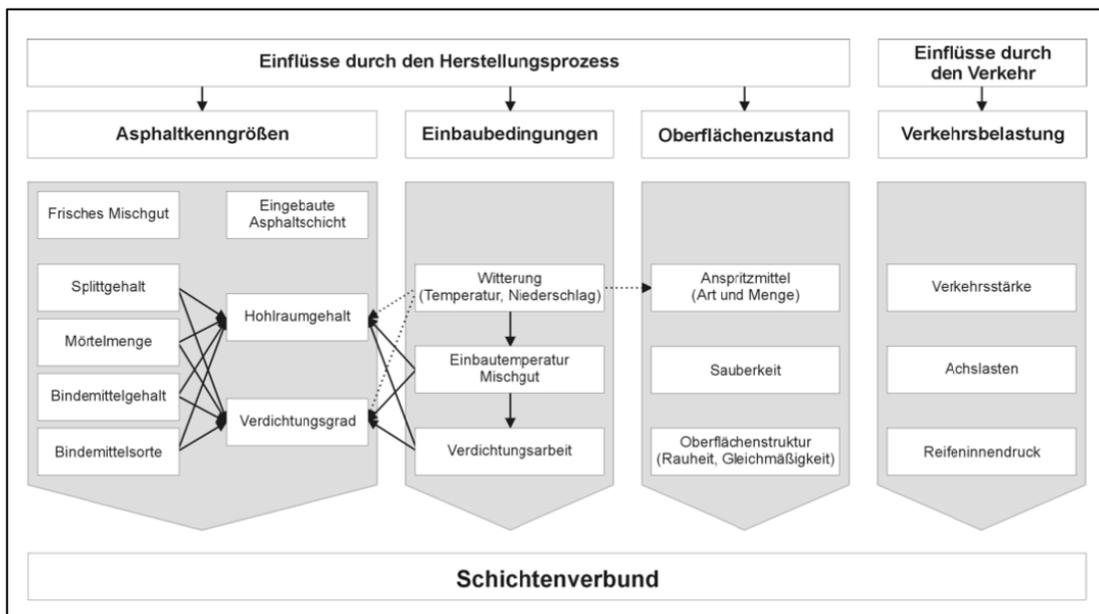


Bild 3: Einflüsse auf den Schichtenverbund nach (Stöckert, 2002)

Die aufgeführten Einflüsse auf den Schichtenverbund gemäß STÖCKERT [2002] wurden in einigen Untersuchungsreihen analysiert. Hier werden einige wichtige Erkenntnisse kurz aufgeführt:

JASKULA wies im Jahr 2014 den Einfluss der Verdichtungsarbeit nach, indem er Probekörper mit verschiedenen Verdichtungsgeräten herstellte. Die Probekörper, die in dieser Versuchsreihe unter Laborbedingungen hergestellt wurden, erzielten den besten Verbund an der Grenzfläche. Der schlechteste Verbund wurde bei Probekörpern gemessen, die mit einer statischen Walze verdichtet wurden (Jaskuła, 2014).

ZHANG [2017] zeigt auf, dass die Scherfestigkeit abhängig von dem Hohlraumgehalt des Mischgutes ist. Asphaltarten mit einer groben Gesteinsstruktur oder einem hohen Anteil an Luftporen, wie z.B. offenporigem Asphalt verringern die Scherfestigkeit an der Grenzfläche (Zhang, 2017).

Den Einfluss von Feuchtigkeit auf den Schichtenverbund wiesen AL-QADI, CARPENTER, LENG und OZER nach. An Laborprobekörpern wurde festgestellt, dass Feuchtigkeit in der Schichtgrenze zu einer Verringerung der Scherfestigkeit führt (Al-Qadi et al., 2008).

1.3.3 Versagensmechanismus und deren Auswirkungen auf die Lebensdauer

Asphaltbefestigungen müssen Spannungen in vertikaler Richtung durch die Radlasten und in horizontaler Richtung durch Brems- und Beschleunigungslasten aufnehmen und in den Untergrund ableiten. Zusätzlich wirken witterungsbedingte Beanspruchungen auf die Asphaltbefestigung ein. Der Schichtenverbund sollte als vollständiger Verbund zwischen den einzelnen Schichten einer Verkehrsflächenbefestigung hergestellt werden. Durch einen vollständigen Verbund soll der komplette Übertrag der auftretenden Belastungen zwischen den einzelnen Asphaltsschichten ermöglicht werden. Fehler im Verbund verändern die Tragfähigkeit und führen zu einem vorzeitigem Materialermüden. Die daraus resultierende Reduzierung der Nutzungsdauer kann durch unterschiedliche Berechnungs- und Vermessungsmethoden ermittelt werden.

GLET [1999] differenziert zwischen vier verschiedenen Versagensmechanismen. Störungen des Schichtenverbundes und dadurch auftretende Versagensmechanismen können zum einen durch keinen Verbund (lose liegende Schichten), zu weichem Verbund (schiebende Schichten), zu dicker Verbundfilm (nicht standfeste Schichten) oder durch zu wenig Mörtel (nur punktförmiger Verbund) auftreten.

WEBER [1991] untersucht die mechanischen Auswirkungen des Versagens für den Schichtenverbund. Hierzu wird vereinfacht der Unterschied zwischen vollständigem und aufgehobenem Verbund anhand eines monolithischen Balkens und einem dreiteiligen Balken veranschaulicht. Der monolithische Balken entspricht hierbei dem Modell des vollständigem Schichtenverbundes. Die Durchbiegung beträgt nach der linearen Biegetheorie für den dreiteiligen Balken eine neunfache Vergrößerung gegenüber dem monolithischen Balken. Bei Betrachtung des Radialspannungsverlaufes kommt es beim dreiteiligen Modell zu Spannungsumlagerungen in den Schichtgrenzen, die an der Unterseite in erhöhten Spannungen resultieren. Das Bild 4 stellt den Unterschied zwischen den Beanspruchungszuständen bei vollständigem und nicht vorhandenem Schichtenverbund gegenüber.

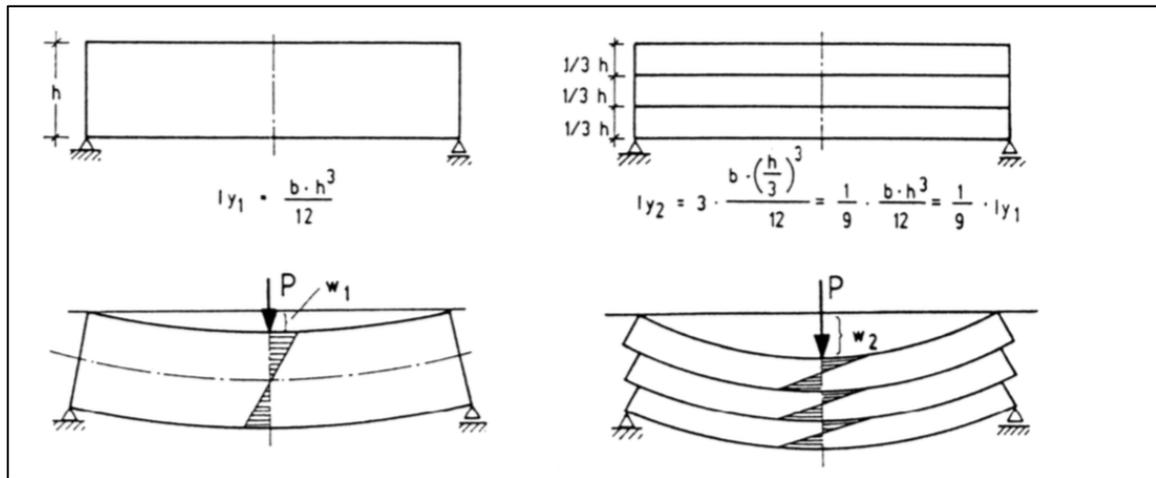


Bild 4: Unterschied zwischen vollständigem Verbund und keinem Verbund bezüglich des Spannungsverlaufes (Weber, 1991)

Im Arbeitspapier „Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen“ [1990] wird der Einfluss von fehlendem Schichtenverbund auf die Nutzungsdauer und die Biegezugspannung aufgezeigt. Bild 5 zeigt hierzu auf, dass die Biegezugbeanspruchung auf Grund von fehlendem Verbund zwischen den einzelnen Schichten an der Unterseite der Asphalttragschicht ansteigt. Es wird deutlich, dass die Biegezugspannung im Vergleich zum fehlenden Schichtenverbund zwischen Binder- und Tragschicht höher ist als bei fehlendem Verbund zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht.

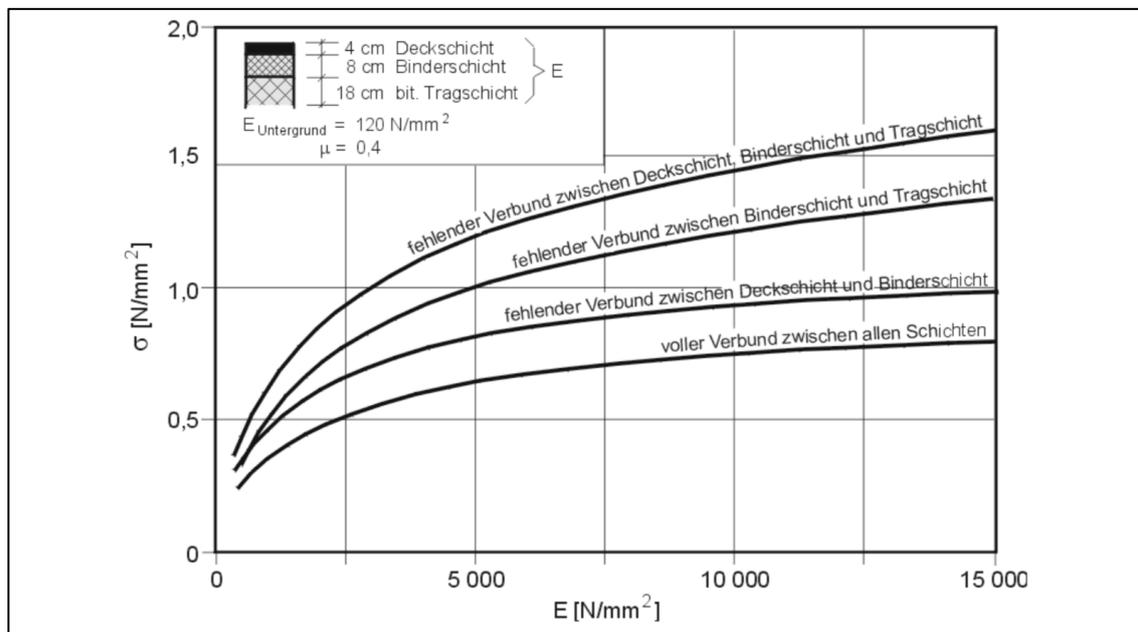


Bild 5: Biegezugspannung an der Unterseite der Asphalttragschicht für ein 50 kN Einzelrad (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 1990)

Insgesamt ist die Beanspruchung bei fehlendem Verbund in allen Schichtebenen der Asphaltdecken am größten. Durch die steigende Biegezugspannung wird die Nutzungsdauer reduziert. Das Arbeitspapier gibt hierfür eine Reduzierung gegenüber dem Wert bei vollem Verbund von 30 bis 40% an. Die Reduzierung ist von den Bauklassen (nach RStO 12 Belastungsklassen) abhängig. Bild 6 stellt die Abnahme der Nutzungsdauer infolge der

Biegezugbeanspruchung für die jeweilige Belastungsklassen grafisch dar.

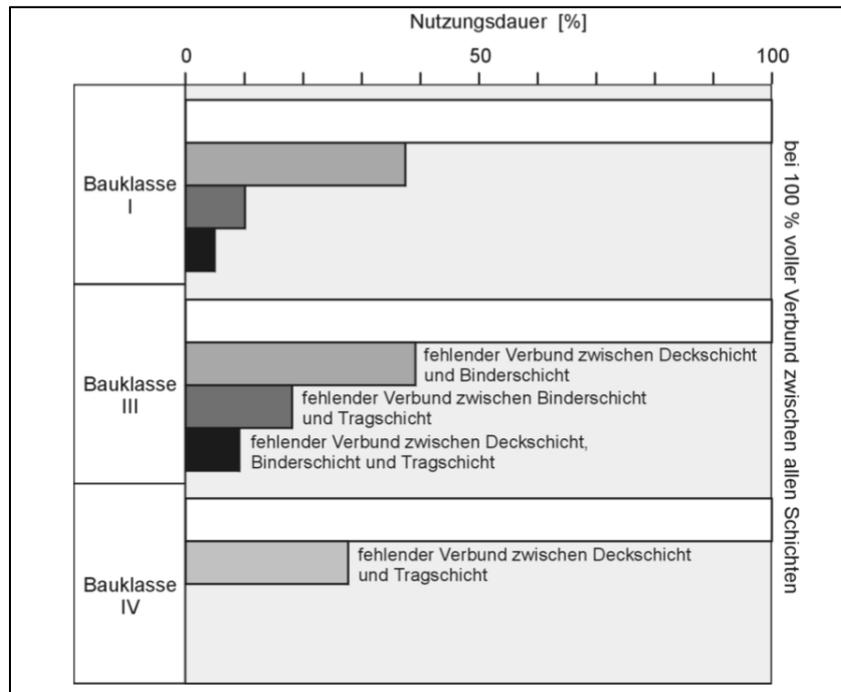


Bild 6: Abnahme der Nutzungsdauer infolge von Biegezugbeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 1990)

Erste Berechnungen mit Hilfe von Computerprogrammen bezüglich der Ursache von Vertikalkräften bezogen auf die Lebensdauer einer Asphaltbefestigung führen METELMANN & BEECKEN im Jahr 1979 durch. Mit dem BISAR-Programm der Firma Shell werden verschiedene Asphaltbefestigungen unter Variation des Schichtenverbundes miteinander verglichen. Als Basis wird festgelegt, dass bei vollem Verbund die relative Lebensdauer 100 % entspricht. Die Lebensdauer reduziert sich bereits auf bis zu 30 % bei fehlendem Schichtenverbund in der oberen Schichtgrenze und auf bis zu 2 bis 7 % bei fehlendem Verbund in allen Schichtgrenzen. Bild 7 zeigt die Ergebnisse der relativen Lebensdauer in Abhängigkeit zur Lastwechselzahl auf.

Lastwechselzahlen		Baukl. I Zeile 1	Baukl. III Zeile 1	Baukl. I Zeile 3	Baukl. III Zeile 3
* Beide Fugen verklebt	Asphalt	$3,0 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^5$
	Untergrund	$> 10^8$	$> 10^8$	$> 10^8$	$2,2 \cdot 10^7$
Obere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	$9,0 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^4$
	Untergrund	$> 10^8$	$6,0 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^6$
Untere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	$1,8 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^4$
	Untergrund	$8,0 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^6$
Beide Fugen ohne Ver- klebung	Asphalt	$1,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^4$
	Untergrund	$5,0 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$
Relative Lebensdauer		Baukl. I Zeile 1	Baukl. III Zeile 1	Baukl. I Zeile 3	Baukl. III Zeile 3
Beide Fugen verklebt	Asphalt	100 %	100 %	100 %	100 %
	Untergrund	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)
Obere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	30 %	30 %	20 %	13 %
	Untergrund	(100 %)	(60 %)	(70 %)	(23 %)
Untere Fuge ohne Ver- klebung	Asphalt	6 %	13 %	4 %	12 %
	Untergrund	(80 %)	(22 %)	(15 %)	(13 %)
Beide Fugen ohne Ver- klebung	Asphalt	3 %	7 %	2 %	5 %
	Untergrund	(50 %)	(17 %)	(7 %)	(5 %)

Bild 7: Berechnung der Lebensdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Schichtenverbund (Metelmann & Beecken, 1979)

KRUNTCHEVA, COLLOP & THOM [2005] analysieren die Auswirkung des fehlenden bzw. schwachen Schichtenverbunds auf die mechanischen Eigenschaften einer Asphaltbefestigung indem sie statisch-lineare FE-Berechnungen durchführen. Hierbei zeigen sie, dass ein fehlender Schichtenverbund innerhalb der gebundenen Schicht zu einer Verkürzung der Lebensdauer von bis zu 45 % führt. Aus diesem Grund ist ein guter Haftverbund zwischen den Schichten im Belag zum einen für die Gebrauchstauglichkeit und Fahrqualität und zum anderen für die gesamte strukturelle Leistung wichtig. Zusätzlich wird dargelegt, dass ein versagender Schichtenverbund innerhalb der gebundenen Schichten nicht durch eine Verbesserung der ungebundenen Schicht aufgefangen werden kann (Kruntscheva et al., 2005).

Auf der Grundlage vorheriger Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „*Untersuchungen zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen*“ der TU Dresden und dem Forschungsprojekt „*Bestimmung des Alterungsverhaltens von Asphaltgemischen als Grundlage für die Bemessung und Prognose der Lebensdauer/Schadensentstehung*“ untersuchen WELLNER, ASCHER & WERKMEISTER [2012] den Einfluss der Bitumenalterung und des Schichtenverbundes auf das Ermüdungs- und plastische Verformungsverhalten von Asphaltbefestigungen. Der Einfluss der Alterung auf den Ermüdungszustand ist als eher gering einzustufen und wirkt sich ggf. sogar positiv aus, da sich durch die Alterung geringere horizontale elastische Dehnungen ergeben. Der Schichtenverbund hat, wie bereits in zahlreichen Forschungsvorhaben festgestellt, einen deutlichen Einfluss auf die Nutzungsdauer. Hierbei wird zwischen fehlendem Schichtenverbund zwischen Deck- und Binderschicht und zwischen Binder- und Tragschicht unterschieden. Ein fehlender oder stark verminderter Schichtenverbund zwischen Binder- und Tragschicht wirkt sich in erheblichem

Maße auf die Nutzungsdauer einer gesamten Asphaltbefestigung aus. Demgegenüber wirkt sich ein fehlender oder stark verminderter Schichtenverbund zwischen Deck- und Binderschicht vergleichsweise gering auf die Nutzungsdauer aus.

WISTUBA & WALTHER [2013] bestätigen die Ergebnisse von Wellner, Ascher und Werkmeister, dass der fehlende Verbund zwischen Binder- und Tragschicht einen erheblich höheren Einfluss auf die Nutzungsdauer hat als der Verbund zwischen Deck- und Binderschicht. Anhand der Schadenshypothese nach MINER [1945], die die Schadenssumme durch Aufsummieren einzelner Schädigungsanteile bildet, wird der Unterschied deutlich. Die Variation des Verbundes zeigt sich signifikant in der Schädigungssumme nach Miner. In Bild 8 ist die Zunahme der Schädigungssumme mit abnehmendem Verbund deutlich zu erkennen. Zusätzlich zeigt sich, dass die Schädigungssumme zwischen vollem Verbund und vollständig aufgelöstem Verbund zwischen Deck- und Binderschicht um ungefähr den Faktor 2 steigt. Die Aufhebung des Verbundes zwischen Binder- und Deckschicht führt zu einer Schädigungssumme von 4,541 und steigt um den Faktor 6,5 im Vergleich bei vollem Verbund.

Durch diese Berechnung ist erwiesen, dass der Schichtenverbund und besonders die Schichtgrenze zwischen Binder- und Tragschicht einen erheblichen Einfluss auf die Schädigungssumme haben und somit die Lebensdauer einer Asphaltbefestigung mitbestimmen (Wistuba & Walther, 2013).

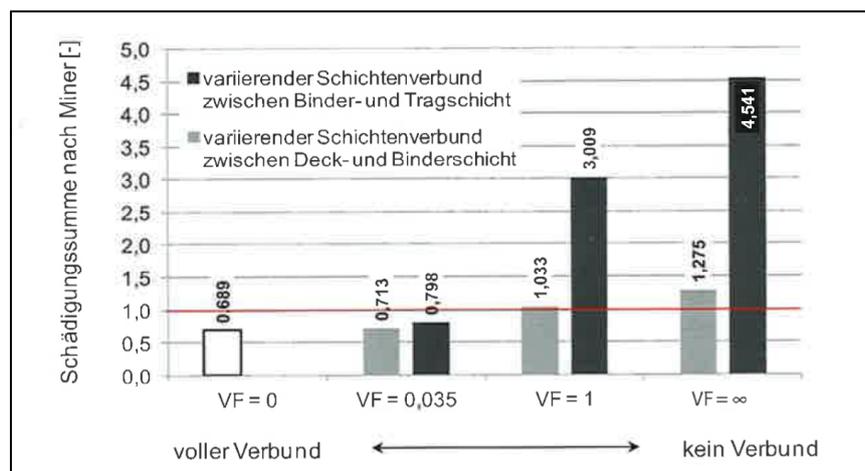


Bild 8: Minersumme bei variierenden Verbundfaktoren (Wistuba & Walther, 2013)

Insgesamt wird durch die bisher erzielten Ergebnisse aus Forschungsprojekten aufgezeigt, dass die Nutzungsdauer einer Verkehrsflächenbefestigung bei Verbundstörungen oder vollständig fehlendem Verbund um bis zu 80 % sinkt im Vergleich zu vollständigem Verbund. Besonders große Auswirkung hat ein fehlender Verbund zwischen der Binder- und Tragschicht.

1.3.4 Auswirkung von Anstrichmittel auf den Schichtenverbund

Seit vielen Jahren werden im Straßenbau Anstrichmittel für einen besseren Verbund zwischen den Schichten der Asphaltbefestigung verwendet. Die Verwendung dieser Mittel wird in vielen Forschungsarbeiten als positiv für den Schichtenverbund beschrieben. Viele Arbeiten (Leutner et al., 2004) (West et al., 2005) (Wistuba & Wellner, 2016) (Kruntscheva et al. 2005) gehen außerdem von einer optimalen Anstrichmenge aus, die abhängig von der Bitumensorte, den Einbaubedingungen und der Belags- und Mischgutbeschaffenheit ist.

Im Jahr 1978 beschreibt STOCH [1978] bereits verschiedene Arten und Anwendungen von Anstrühmitteln. Geeignete Anstrühmittel für den Schichtenverbund sind Bitumenemulsionen, polymermodifizierte Bitumenemulsion oder Haftkleber. Haftkleber enthalten neben dem Bitumen noch Haftmittel, Lösungsmittel und Wasser. Die Anstrühmittel müssen gleichmäßig angespritzt werden. Wird zu viel Anstrühmittel aufgetragen, besteht die Gefahr einer „Überfettung“. Hierdurch entstehen Gleitebenen und die Verformungsresistenz einer Asphaltbefestigung wird herabgesetzt. Bei richtiger Anwendung wirkt sich die Verwendung von Anstrühmitteln positiv aus und ist zu empfehlen (Stoch, 1978).

LEUTNER, RENKEN & LOBACH [2004] beurteilen die Wirkung von verschiedenen Anstrühmitteln auf den Schichtenverbund sowie verschiedene Anstrühmengen. Hierzu vergleichen sie drei verschiedene Anstrühmittel (Haftkleber, Bitumenemulsionen, polymermodifizierte Bitumenemulsion) miteinander. Um diese Mittel miteinander vergleichen zu können, erfolgt die Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner sowie die Haftzugfestigkeitsprüfung. Die Probekörper werden mit drei verschiedenen Mengen mit einer Wassersprühflasche im Labor besprüht. Hier zeigt sich, dass die optimale Menge bei allen Asphaltvarianten bei 150 g/m^2 liegt. Höhere Anspritzmengen (250 g/m^2 & 350 g/m^2) führen zu schlechteren Ergebnissen, da sich in diesen Fällen ein Gleitfilm bildet. Die günstigste Verbundwirkung erzielt die polymermodifizierte Bitumenemulsion (Leutner et al., 2004).

WEST [2005] weist ebenfalls nach, dass die Aufbringrate der Emulsion entscheidend ist. Eine niedrige Aufbringrate erzielt nach seinen Erkenntnissen eine höhere Festigkeit (West et al., 2005).

WISTUBA & WELLNER [2016] ermitteln für zwei bestimmte Bitumenemulsionen C60BP1-S und C40BF1-S die optimale Menge. Für die Herstellung des Schichtenverbundes zwischen fein geschliffenen Oberflächen ergibt sich für die Bitumenemulsion C60BP1-S eine optimale Menge von 200 g/m^2 , die der geringsten Menge der Versuchsreihe entspricht. Hingegen ist bei der Anwendung einer Bitumenemulsion C40BF1-S (Haftkleber) für die Herstellung des stärksten Schichtenverbundes die Menge von 400 g/m^2 notwendig. MOHAMMAD [2009] konnte hingegen in seiner Studie kein Optimum für die Anstrühmenge finden (Mohammad et al., 2009).

Die Wirkung des Anstrühmittels ist aber nicht nur abhängig von der Menge, sondern auch von der Oberflächenbeschaffenheit, Anstrühmittelsorte und Temperatur. Untersuchungen zeigen, dass polymermodifiziertes Anstrühmittel bessere Festigkeiten bei Schichtenverbundprüfungen erzielt als nicht modifiziertes Anstrühmittel (Leutner et al., 2004) (Wistuba & Wellner, 2016) (Raab & Partl, 2017).

RAAB & PARTL [2017] raten aus diesem Grund im Zweifelsfall den Einsatz von polymermodifiziertem Anstrühmittel. Auf jeden Fall soll dies geschehen, wenn im Belag polymermodifiziertes Bindemittel eingesetzt wurde.

Erkenntnisse zum Einfluss der Temperatur zeigen die Ergebnisse von WISTUBA & WELLNER [2016]. Anhand der Schersteifigkeit wird nachgewiesen, dass die Verklebung zwischen Schichtgrenzen sehr stark temperaturabhängig ist. Bei niedrigen Temperaturen von -10°C ist die Verklebung sehr stark und nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei der geprüften Höchsttemperatur von 50°C ist die Verklebung praktisch nicht mehr vorhanden. Mit steigender Temperatur durch Verschlechterung der Verklebung sinkt die Scherfestigkeit.

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit wird auch in zahlreichen Forschungsvorhaben untersucht. LEUTNER, RENKEN & LOBACH (2004) untersuchen unter anderem durch Versuchsreihen den Einfluss von bewitterten Oberflächen. Durch die Ergebnisse lässt sich

zeigen, dass Anstrümmittel bei bewitterten Oberflächen einen positiven Einfluss auf den Schichtenverbund besitzt. Probekörper, die nicht mit Anstrümmittel behandelt sind, erzielen geringere Festigkeiten. Zum selben Ergebnis kommen RAAB & PARTL im Jahr 2007. Sie prüfen den Einfluss von Schmutz und Wasser bei der Verwendung von Anstrümmittel. Kommt es zur Verschmutzung vor oder nach der Applikation, werden in beiden Fällen bessere Verbundkräfte erzielt, als ohne Anstrümmittel. Die Verschmutzung wirkt sich zwar negativ auf die Verbundkräfte aus, das Anstrümmittel kann diese Verschmutzung aber im geringen Maß kompensieren.

Das Langzeitverhalten von Anstrümmittel in der Praxis wird von RAAB & PARTL im Jahr 2017 durch Versuchsstrecken untersucht. Durch die Entnahme und Prüfung von Bohrkernen nach der Herstellung, nach 3 Monaten und nach 12 Monaten Nutzung wird durch die Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner die Verbundscherkraft über die Zeit geprüft. Bei allen Objekten ist eine Zunahme über die Zeit zu erkennen. Die Verbesserung des Schichtenverbundes lässt auf das weitere Abbinden der Anstrümmittel schließen.

1.3.5 Historische Entwicklung von Anstrümmittel

Ein guter Schichtenverbund zwischen den Asphaltsschichten ist eine wesentliche Voraussetzung für eine ausreichende Dauerhaftigkeit einer Asphaltbefestigung. Seit vielen Jahren werden im Straßenbau aus diesem Grund Anstrümmittel zwischen den Schichten verwendet. Das Anstrümmittel soll den Verbund zwischen den Asphaltsschichten verstärken. Als Anstrümmittel werden hauptsächlich Bitumenemulsionen eingesetzt.

Emulsionen wurden Anfang 1900 entwickelt und fanden bereits 1903 erste Anwendungen als emulgiertes Rohöl (Asphalt Institute & AEMA, 1997). Im Jahr 1922 wurde von dem englischen Chemiker Hugh Alan Mackay das Patent für Bitumenemulsion eingereicht. Am Anfang waren das Wissen und die Anwendungsmöglichkeiten für den Straßenbau sehr gering, zusätzlich gab es noch sehr geringe Auswahlmöglichkeiten von Emulsionen. Zwischen den Jahren 1922 und 1950 ist die Verwendung von Emulsion mit anfänglich von 2.500 t bis hin zu 325.000 t deutlich gestiegen. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden ausschließlich anionische Emulsionen verwendet (SFERB, 2008).

Im Jahr 1951 wurden die kationischen Emulsionen entwickelt, die für den Straßenbau von besonderer Bedeutung sind. In den darauffolgenden Jahren wurden die anionischen Emulsionen zunehmend durch die kationischen Emulsionen ersetzt. Heute sind fast 100 % der verwendeten Emulsionen kationisch (SFERB, 2008). In Bild 9 ist die zeitliche Entwicklung der Verwendung von Bitumenemulsion dargestellt.

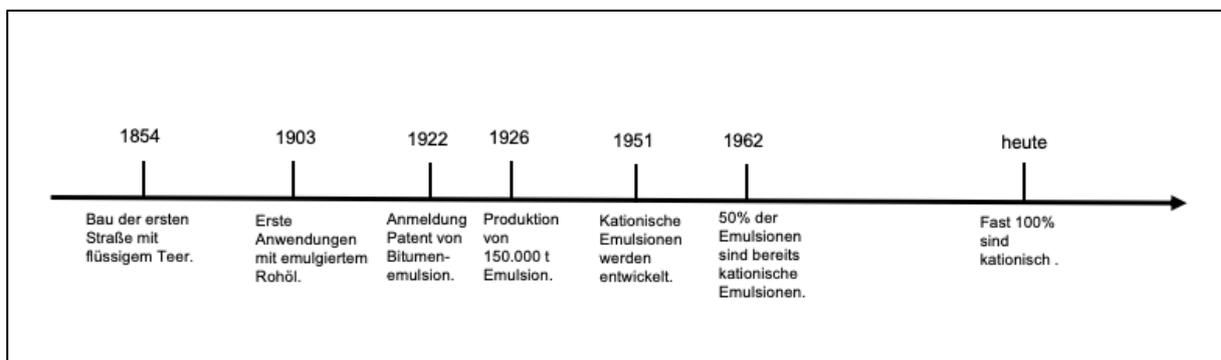


Bild 9: Zeitstrahl der Entwicklung der Bitumenemulsion

1.3.6 Zusammensetzung von Anstrümmittel

Als Anstrümmittel wird hauptsächlich Bitumenemulsion verwendet. Emulsionen sind Gemische zweier Flüssigkeiten, die normalerweise nicht miteinander mischbar sind. Im Allgemeinen bestehen Emulsionen aus einer inneren und äußeren Phase. Die innere Phase (disperse Phase) liegt dabei als Tröpfchen in der äußeren Phase (Dispersionsmittel) vor und wird durch einen Emulgator stabilisiert. In einer Bitumenemulsion ist das Wasser das Dispersionsmittel und das Bitumen die disperse Phase (Holl, 2004).

Als disperse Phase kann Straßenbaubitumen, Polymerbitumen oder eine Kombination aus Bitumen und Latex eingesetzt werden (Glet, 2003).

Die Hinzunahme eines Emulgators als Hilfsstoff für die Herstellung einer Bitumenemulsion hat großen Einfluss auf die Eigenschaften der Emulsionen. Emulgatoren sind grenzflächenaktive Stoffe, die sich an der Oberfläche des Bitumenkügelchen anreichern und mit dem langkettigen Anteil im Bitumen verankern. Dadurch wird die Oberflächenspannung herabgesetzt und eine weitere Aufteilung ermöglicht. Die Emulgatorhülle (s. Bild 10) um das Bitumenkügelchen verhindert ein schnelles zusammenfließen der Bitumenkügelchen. Kationische Emulgatoren bewirken eine bessere Haftung am Gestein (Holl, 2004). Desto stärker das Bitumenkügelchen mit dem Emulgator umhüllt ist, umso mehr entstehen unterschiedliche Emulsionsstabilitäten. Es wird zwischen unstabil und stabil unterschieden. Im stabilen Zustand sind die Emulgatormoleküle im Überschuss und können erst am negativ geladenen Gestein abgebaut werden. Im unstabilen Zustand sind zu wenig Emulgatormoleküle vorhanden und die Bitumenkügelchen können schneller koagulieren (Glet, 2003)

Es wird zwischen kationischer und anionischer Emulsion unterschieden. Anionische Emulsionen zeichnen sich durch eine negative Ladung aus und eignen sich besonders für basisches Gestein. Kationische Emulsionen besitzen hingegen eine positiv geladene Oberfläche. Hierdurch haften diese besonders gut an saurem Gestein wie Quarz. Jedoch haften sie auch an allen übrigen Gesteinen. Aus diesem Grund werden überwiegend kationische Emulsionen verwendet (Holl, 2004). Im nachfolgendem wird deshalb nur noch von kationischen Emulsionen gesprochen.

Bild 10 stellt schematisch die Anreicherung des Emulgators am Bitumenkügelchen dar.

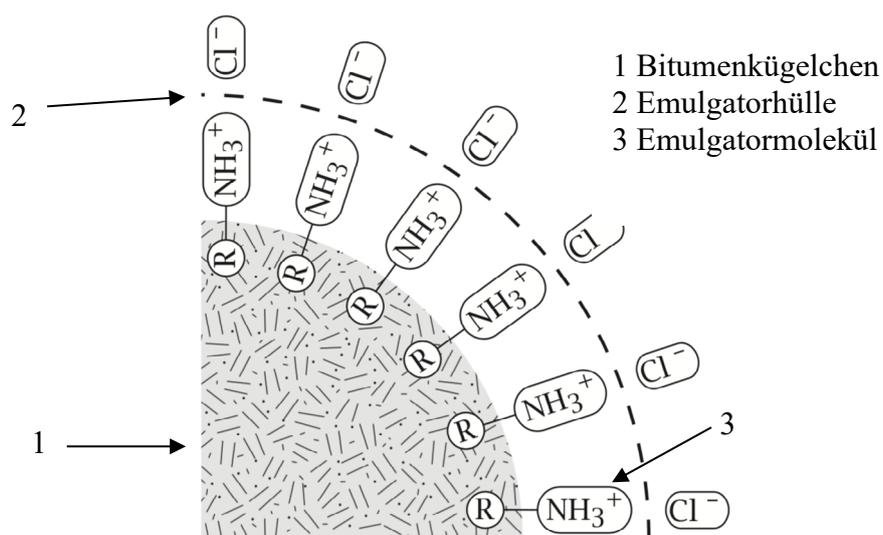


Bild 10: Kationische Bitumenemulsion (Holl, 2004).

1.3.7 Herstellverfahren von Anstrichmittel

Kationische Bitumenemulsionen werden in der Regel in Kolloidmühlen hergestellt. In der Kolloidmühle werden die Wasser- und Bitumenphase zusammengeführt und unter Einwirkung von Energie vermischt. Die notwendige Energie wird durch eine rotierende Scheibe aufgebracht, die eine Scherkraft erzeugt. Zur Überwindung der Oberflächenenergie der Bitumenphase und schlussendlich zur Aufteilung der Phase wird die Scherkraft benötigt (Nouryon Chemicals Holding B.V., o. J.) (Holl, 2004).

Höhere Scherkräfte führen zu einer feineren Aufteilung. Durch den Aufteilungsgrad können grundsätzlich die anwendungstechnischen Gegebenheiten eingestellt werden (Holl, 2004).

Bevor die Bitumenphase und die Wasserphase zusammengeführt werden, kann das Bitumen und Wasser je nach Anforderung der Bitumenemulsion mit Zusatzstoffen vermischt werden. Das Bitumen kann beispielweise mit Fluxmittel, polymodifiziertem Bitumen oder Latex vermischt werden. Die Wasserphase wird in einem Tank vorbereitet, in dem erhitztes Wasser, der Emulgator und weitere Emulsionschemikalien dosiert und gemischt werden. Anschließend werden die beiden Phasen, wie oben beschrieben, zusammengeführt (Nouryon Chemicals Holding B.V., o. J.).

1.3.8 Brechverhalten von Anstrichmittel

Das Brechverhalten einer Bitumenemulsion, welche als Anstrichmittel eingesetzt wird, beschreibt das Abtrennen von Wasser und Bitumen. Der gesamte Ausscheidungsvorgang wird als Abbinden bezeichnet (Holl, 2004).

Nach HOLL [2004] beginnt der Abbindevorgang durch die Anlagerung des Bindemittels am Gestein. Durch den Kontakt der Bitumenpartikel mit dem Gestein erfolgt spontan ein Ladungsaustausch zwischen Bitumenkügelchen und Gestein.

GLET [2003] beschreibt das eigentliche Brechverhalten der Bitumenemulsion anhand eines 5 stufigen Modelles. In der ersten Stufe sind die Bitumenkügelchen frei beweglich. In dieser Stufe besteht die einzige Möglichkeit die Emulsion homogen zu vermischen. Aus diesem Grund müssen alle Mischvorgänge, Verdünnungen, Verarbeitungen, Rühren usw. in dieser Phase erfolgen. Dies ermöglicht eine geschlossene Umhüllung der Mineralstoffe und des Untergrundes.

In der zweiten Stufe beginnt das Brechen der Bitumenemulsion, indem sich die Bitumenkügelchen zusammenballen. Es bilden sich erste Konglomerate. Eine gleichmäßige Mischung und Verarbeitbarkeit ist nicht mehr möglich.

In der darauffolgenden dritten Phase haben sich die Konglomerate soweit miteinander verbunden, dass keine einzelnen Bitumenkügelchen mehr erkennbar sind. Die Konglomerate sind aber noch mit Wasser umhüllt, sodass sie keine eigenständige Phase bilden können.

Anschließend wird in der vierten Phase die Bitumenphase geschlossen und ist nicht mehr dispergierend. Hier beginnt die Kohäsion, indem die Zusammenballungen sich miteinander verknüpfen. Bei dieser Verknüpfung besteht die Gefahr, dass Wasser eingeschlossen wird und sich eine Art Invertemulsion (Wasser in Bitumen) bildet.

Die abschließende letzte Phase ist die fünfte Phase. Der Abbindevorgang ist abgeschlossen, das Bitumen bildet eine vollständig geschlossene Phase. Es kann seine Eigenschaften vollständig entfalten mit voller Adhäsion und Kohäsion. Das eingebaute Mischgut ist nach dieser Phase fest und voll belastbar.

1.3.9 Applikation von Ansprühmittel

Das Aufbringen von Ansprühmittel ist ein wichtiger Faktor, um einen anforderungsgerechten Schichtenverbund zu erzielen. Wichtig ist dabei, dass das Ansprühmittel gleichmäßig und mit der richtigen Menge aufgetragen wird. Das ist allerdings von vielen Faktoren abhängig (Mohammad et al., 2012):

- Größe der Düse
- Höhe Sprühbalken
- Druck der Applikation
- Temperatur von dem Ansprühmittel
- Ausrichtung der Düsen

In Bild 11 ist nach (Mohammad et al., 2012) dargestellt, wie eine optimale Applikation erfolgen sollte.

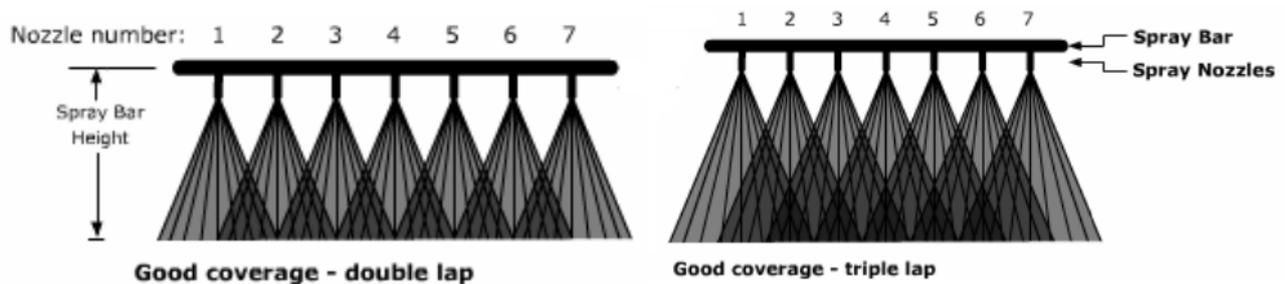


Bild 11: Einstellung der Applikationsanlage nach (Mohammad et al., 2012)

Die Wahl der Dosierung der Bitumenemulsion auf die Unterlage ist essentiell um die Anforderungen des Schichtenverbundes der Straßenbefestigung zu erfüllen. In Deutschland werden in der ZTV Asphalt-StB 07/13 hinsichtlich der Belastungsklassen die Ansprühmittel empfohlen.

Für die Belastungsklassen Bk100 und Bk3,2 ist eine polymermodifizierte Bitumenemulsion (C60BP4-S) zu verwenden (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2013). Je nach Untergrundbeschaffenheit ergeben sich unterschiedliche Dosiermengen. Tabelle 3 listet diese abhängig der Beschaffenheit der Unterlage und der Asphaltart auf. Die Unterlage wird hier nach frisch, gefräst und sehr offenporig/ausgemagert klassifiziert.

Art und Beschaffenheit der Unterlage		Aufzubringende Schicht		
		Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht aus Splittmastix-asphalt oder Asphaltbeton
		Ansprühmenge C60BP1-S in g/m ²		
Asphalttragschicht	f	150 bis 250	250 bis 350	X
	gf	250 bis 350	250 bis 350	X
	o/a	300 bis 400	300 bis 500	X
Asphaltbinderschicht	f	-	X	150 bis 250
	gf	-	250 bis 350	250 bis 350
	o/a	-	300 bis 500	250 bis 350
Erläuterungen:				
f = frisch				
gf = gefräst				
o/a = sehr offenporig oder ausgemagert bzw. Kornausbruch				
X = sind objektbezogen zu betrachten				
- = sollte nicht vorkommen				

Tabelle 1: Art und Dosierung der polymermodifizierten Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Unterlage in den Belastungsklassen Bk100 bis Bk3,2 (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2013)

Tabelle 1 definiert die Dosiermengen für die Belastungsklassen Bk1,8 und Bk0,3. Nach der ZTV Asphalt-StB empfiehlt sich hier die Bitumenemulsion C40BF1-S.

Art und Beschaffenheit der Unterlage		Aufzubringende Schicht	
		Asphalttragschicht	Asphaltdeckschicht aus Splittmastix-asphalt oder Asphaltbeton
		Ansprühmenge C40BF1-S in g/m ²	
Asphalttragschicht	f	200 bis 300	200 bis 300
	gf	300 bis 400	200 bis 300
	o/a	350 bis 450	300 bis 400
Erläuterungen:			
f = frisch			
gf = gefräst			
o/a = sehr offenporig oder ausgemagert bzw. Kornausbruch			

Tabelle 2: Art und Dosierung der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Belastungsklasse Bk1,8 und Bk0,3

Die aufgezeigten Werte der Tabelle 1 und Tabelle 2 werden überarbeitet und sollen zukünftig durch angepasste Ansprühmengen ersetzt werden. Die überarbeiteten Ansprühmengen sollen durch den Arbeitskreis der FGSV 7.4.3 erstellt und durch den Arbeitsausschuss der FGSV 7.4 freigegeben werden.

Eine Entwurfsversion ist in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellt. Tabelle 3 definiert die Ansprühmengen nach der zu überbauenden Asphalt-schicht/-lage und Tabelle 4 definiert die Ansprühmengen in Abhängigkeit der Unterlage. Die Ansprühmengen dieser beiden Tabellen werden in diesem Forschungsvorhaben verwendet und überprüft. Anhand der Ergebnisse sollen anschließend Empfehlungen für die Anwendung verfasst werden.

Art und Beschaffenheit der zu überbauenden Asphalttschicht/-lage		Aufzubringende Asphalttschicht/-lage					
					Asphaltdeckschicht aus		
		Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	Asphalttragdeckschicht	Splittmastixasphalt und Asphaltbeton	Offenporigem Asphalt	Gussasphalt
		Ansprühmenge C60BP4-S in g/m ² (C40B5-S in g/m ²)*					
Asphalttragschicht	geschlossen / dicht	200-300	200-300		200-300		
	ausgemagert / offenporig	300-400	300-400		300-400		
Asphaltbinderschicht	geschlossen / dicht				200-300	X	-
	ausgemagert / offenporig				200-300		
Gussasphaltschicht	rau					200-300	-

Erläuterungen:

- * (C40B5-S in g/m²): Anwendung in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen wie z.B. innerörtliche Baumaßnahmen, Bauzeiten, Jahreszeit/Witterung, Kleinfächen möglich
- X sind objektbezogen zu betrachten
- Ansprühen nicht vorgesehen

Tabelle 3: Dosierung in Abhängigkeit von der zu überbauenden Asphalttschicht/-lage in den Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 0,3

Art und Beschaffenheit der Asphaltunterlage		Aufzubringende Asphalttschicht/-lage					
					Asphaltdeckschicht aus		
		Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	Asphalttragdeckschicht	Splittmastixasphalt und Asphaltbeton	Offenporigem Asphalt	Gussasphalt
		Ansprühmenge C40B5-S in g/m ² (C60BP4-S in g/m ²)*					
angefräste Unterlage	geschlossen / dicht / feinstrukturiert	250-350	250-350	250-350	250-350	250-350	200
	ausgemagert / offenporig / grobstrukturiert	350-450	350-450	350-450	300-400		X
nicht gefräste Unterlage	geschlossen / dicht	X	200-300	200-300	200-300		X
	ausgemagert / offenporig	X	300-400	300-400	300-400		

Erläuterungen:

- * (C60BP4-S in g/m²): Anwendung in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen wie z.B. Bauzeiten, Jahreszeit/Witterung, Beschaffenheit der Unterlage möglich
- X sind objektbezogen zu betrachten

Tabelle 4: Dosierung der Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Asphaltunterlage in den Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 0,3

Für die Verwendung von Bitumenemulsion als Anstrichmittel für den Schichtenverbund gelten gemäß der ZTV Asphalt-StB Ausgabe 07/13 die in Tabelle 5 aufgeführten Abfüll-, Lager- und Verarbeitungstemperaturen.

Bindemittelart	Bindemittel-sorte	Abfüll-temperatur °C		Lager-temperatur °C		Verarbeitungs-temperatur °C	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
Polymermodifizierte Bitumenemulsion	C60BP1-S	5	80	5	80	20	80
Bitumenemulsion mit Fluxmittel	C40BF1-S	5	70	5	70	20	70

Tabelle 5: Abfüll-, Lager- und Verarbeitungstemperaturen gemäß ZTV Asphalt-StB

2.1 Untersuchungsmethodik

Zur Überprüfung der Wirkung von Anstrichmittel auf den Schichtenverbund durch Variation der Anstrichmenge und Oberflächentextur werden verschiedene Versuche durchgeführt.

Dem Versuchsablauf stehen zwei Bitumenemulsionen unterschiedlicher Zusammensetzung zur Verfügung. Diese werden im Laufe des Untersuchungsablaufs als Anstrichmittel verwendet. Um die Auswirkung von Anstrichmittel beurteilen zu können, werden Asphaltplatten mit unterschiedlichen Oberflächentexturen hergestellt. Hierzu werden zum einen Platten aus bestehenden Asphaltbefestigungen gesägt und zum anderen Asphaltplatten mit der Größe 320 mm x 260 mm mit dem Walz-Sektor-Verdichtungsgerät hergestellt. Die Platten werden anschließend mit unterschiedlichen Mengen der Bitumenemulsion appliziert. Außerdem wird die Textur ausgewählter Platten mit einer 3D-Oberflächenkamera gemessen. Daraus lassen sich Höhenprofile erstellen, die entlang vorgegebener Linien verlaufen. Diese Höhenprofile können vor und nach der Applikation der Emulsionen gemessen werden und lassen somit Aussagen über die Verteilung der Bitumenemulsion auf der Oberfläche zu.

Zur Überprüfung der Schichtenverbundgüte werden die besprühten Platten mit einer neuen Asphaltsschicht überbaut. Die Herstellung erfolgt mit dem Walz-Sektor-Verdichter. Aus den Asphaltpaketen werden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm gebohrt. An diesen Bohrkernen werden nach der TP Asphalt-StB Teil 80 und Teil 81 der Abscherversuch nach Leutner geprüft.

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Versuche kann die Auswirkung der Anstrichmenge und der Oberflächentextur beurteilt werden. Hierdurch können Rückschlüsse für die Bauvorhaben der Versuchsstrecke ermittelt werden.

Außerdem werden die aus den Bitumenemulsionen gewonnen Bitumina auf ihre Eigenschaften untersucht. Neben der Nadelpenetration, dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Elastischen Rückstellung werden auch die Bitumina auch im Dynamischen Scherrheometer (DSR) geprüft. Hieraus können die Eigenschaften der Bindemittel bestimmt werden. Diese können einen entscheidenden Beitrag zur Güte des Schichtenverbundes liefern.

2.2 Probenkörperbeschaffung und Herstellung

2.2.1 Beschaffung von Asphaltprobekörpern

Zur Überprüfung der Ansprühmittel auf unterschiedlichen Oberflächentexturen werden aus bestehenden Asphaltbefestigungen mit gefräster Oberfläche Platten gesägt. Die Platten werden in der Größe 320 mm x 260 mm aus den Asphaltbefestigungen entnommen. Die Schichtdicke der Platten liegt zwischen 4-6 cm je nach Schichtart. Aus einer mit einer Standardfräse LA 15 und mittlerer Geschwindigkeit bearbeitete Asphaltstraße werden Platten ausgesägt.

Der Ausbau der gefrästen Platten aus einer Baumaßnahme in Niedersachsen ist in Bild 12 dargestellt.



a) Fräsfläche



b) Sägen der Plattenmaße



c) Entnahme der Platten

Bild 12: Ausbau der gefrästen Platten

Die Zusammensetzung der Asphaltunterlage der entnommenen Asphaltplatten ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

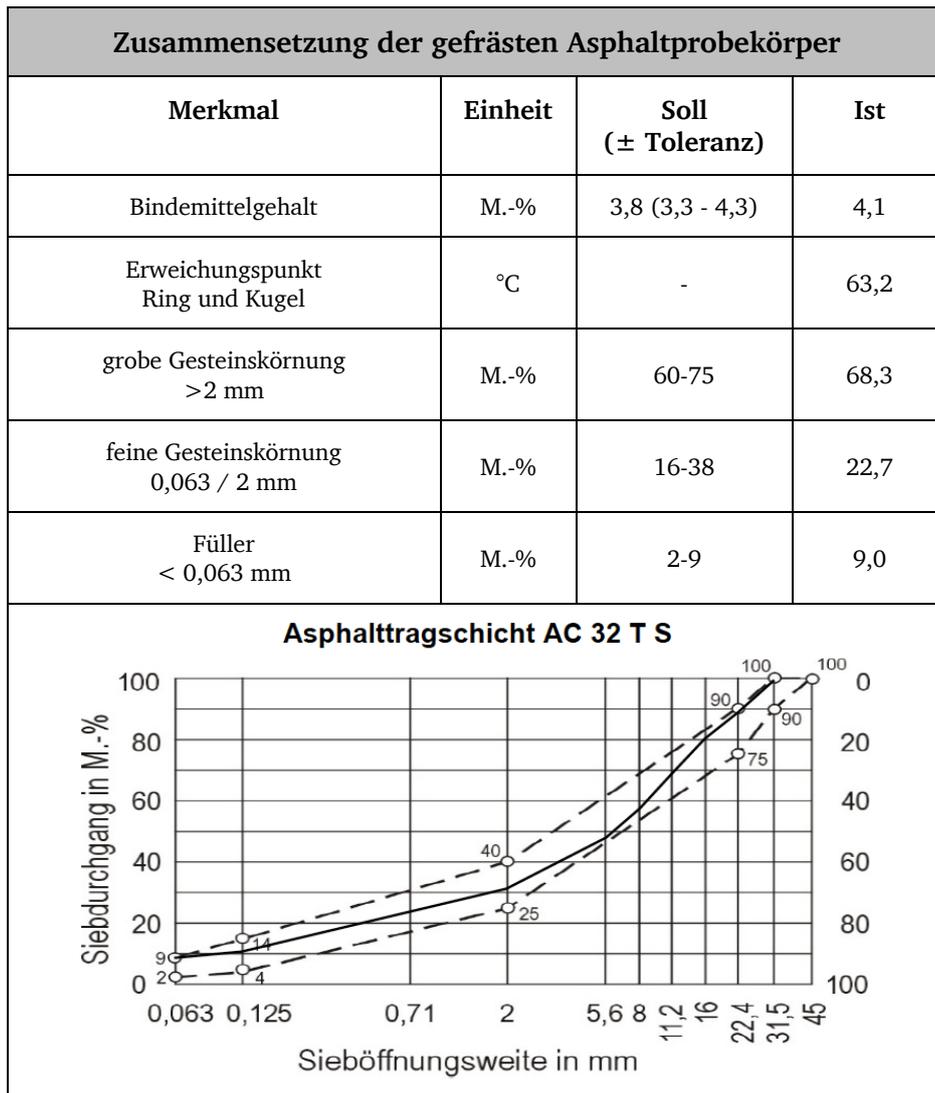


Tabelle 6: Zusammensetzung der gefrästen Asphalttragschicht

Die Zusammensetzung der gefrästen Asphalttragschicht (AC 32 TS) entspricht den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13 und der ZTV Asphalt-StB 07/13.

2.2.2 Herstellung von Asphaltplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät

Zusätzlich zu den Platten aus bestehenden Asphaltbefestigungen werden neue Platten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt. Die Herstellung der erforderlichen Asphaltplatten erfolgt nach der TP Asphalt-StB Teil 33.

Hierbei wird das Asphaltmischgut in eine Verdichtungsform eingefüllt und mit einem Walzsektor verdichtet. Der Verdichtungsprozess teilt sich hierbei in eine Vorverdichtung und in eine Hauptverdichtung. Die Vorverdichtung erfolgt weggeregelt bei einer Höchstlast von 2,6 kN. Die Hauptverdichtung erfolgt kraftgeregelt, die Höchstlast des Walzübergangs beträgt 19,5 kN. Nach dem Verdichtungsprozess wird die Asphalt-Probepatte aus der Verdichtungsform ausgepresst. Anschließend ist die Platte auf Raumtemperatur abzukühlen. Die Größe der

Asphalt-Probepplatten beträgt 320 mm x 260 mm bei einer variabel einstellbaren Höhe (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2007).

Mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät ist die Herstellung eines Asphaltpaketes aus zwei oder mehr Schichten möglich. Hierbei werden die hergestellten Platten nach dem Ansprühen mit Bitumenemulsion mit einem frischen Asphalt überbaut. Anschließend wird die Platte aus dem Gerät entnommen und abgekühlt, danach werden 2 Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen und die Haftzugfestigkeitsprüfung oder der Abscherversuch nach Leutner durchgeführt.

Die frischen Platten werden aus einer Asphalttragschicht und einer Binderschicht hergestellt. Zur Herstellung wurde Mischgut aus einem Mischwerk in Oberursel verwendet. Die Zusammensetzung der jeweiligen Mischgutsorte ist in Tabellen 7 und 8 dargestellt.

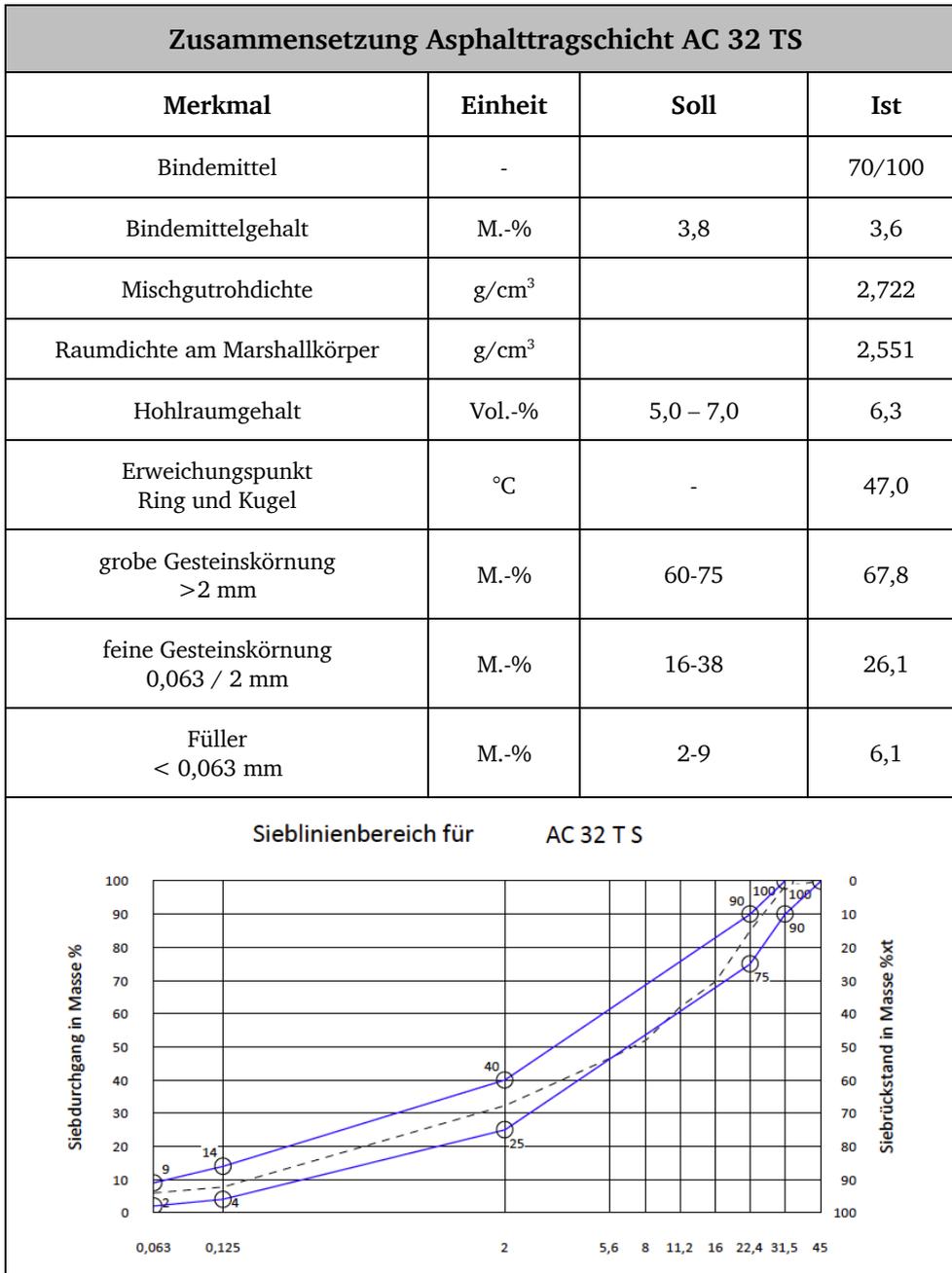


Tabelle 7: Zusammensetzung Mischgut AC 32 TS

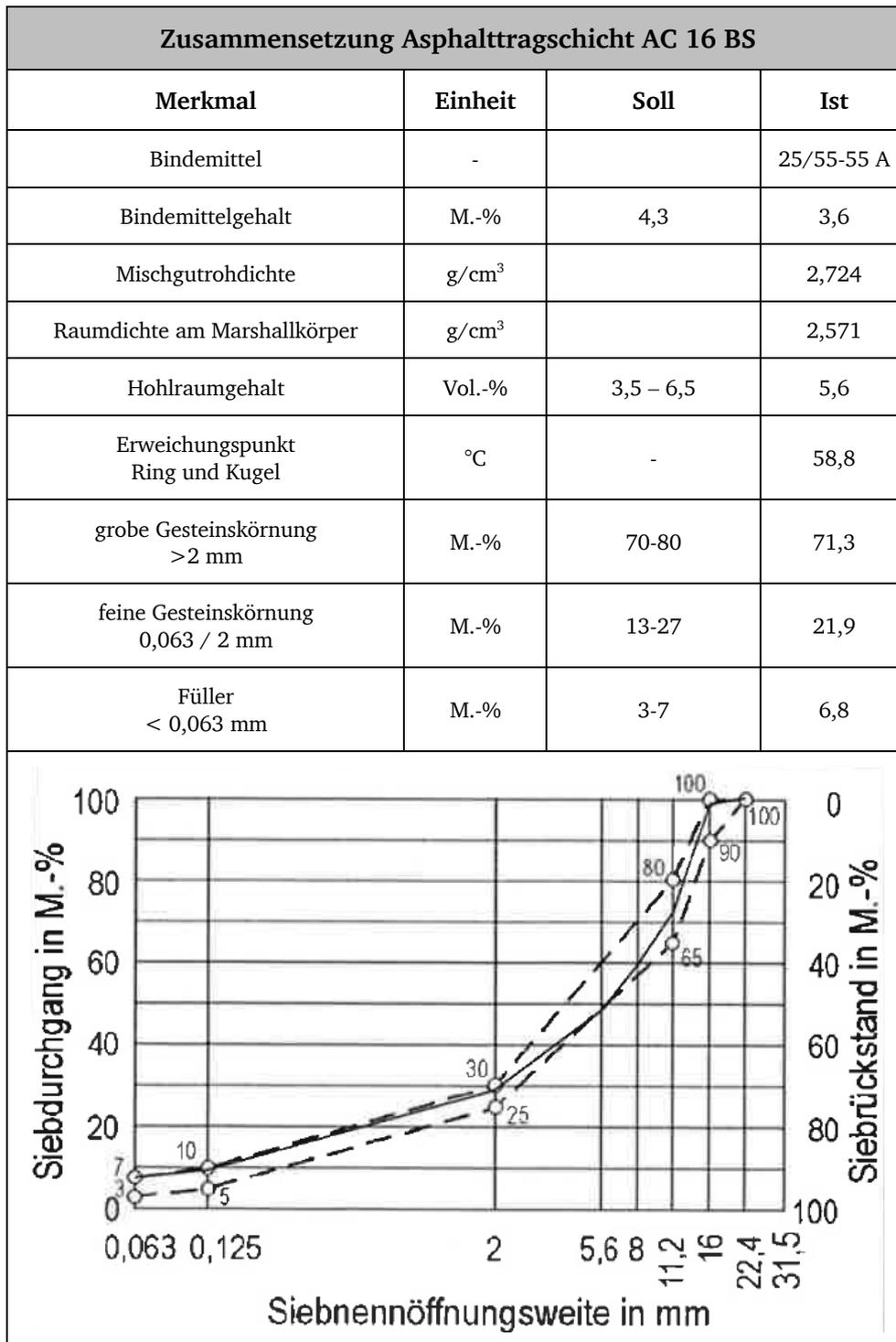


Tabelle 8: Zusammensetzung Mischgut AC 16 BS

Für den Überbau der Platten werden ebenfalls die Mischgüter aus den Tabellen 7 und 8 genommen.

2.3 Festlegung der Präparationsvarianten der Unterlagenoberfläche

Zur Untersuchung des Einflusses von Störgrößen und der Oberflächentextur auf den Schichtenverbund werden die Probekörper (Asphaltplatten) unterschiedlich vorbehandelt. Die Varianten der Präparation richtet sich hierbei nach den realen Bedingungen auf der Baustelle, die Verschmutzungen durch Baustellenverkehr und die maschinentechnische Möglichkeit simulieren sollen. Dadurch sollen erste Aussagen über den Einfluss der Beschaffenheit der Unterlage auf den Schichtenverbund möglich sein.

Tabelle 9 stellt die unterschiedlichen Vorbehandlungen der Oberfläche dar. Die Probekörper mit der gefrästen Oberfläche werden durch eine Standardfräse LA 15 mit einer Breite von 2 m und mittlerer Fräsgeschwindigkeit hergestellt.

Präparationsvarianten der Oberfläche	
Asphaltschicht	Variante
ATS	gefräst
ABS	neu hergestellt

Tabelle 9: Präparationsvarianten der Oberfläche

2.4 Erfassung der Oberflächentextur

Die Oberflächentextur soll mit Hilfe von Aufnahmen von 3D Bildern analysiert werden, um zum einen die Verteilung der Bitumenemulsionen auf unterschiedlichen Unterlagen bestimmen zu können und zum anderen die Textur der Oberfläche zu kennen. Zur Aufnahme der Bilder dient das optische 3D-Messgerät MikroCAD. Die Bilder können anschließend durch die ODSCAD-Software ausgewertet werden. Das Gerät verfügt über drei verschiedene Fokusse, die es ermöglichen, eine ausreichend große Fläche um die Oberflächentextur zu beschreiben. Tabelle 10 vergleicht die verschiedenen Fokusse hinsichtlich der Abmessung und der Fläche, die aufgenommen wird.

Messflächengröße		
Beschreibung [-]	Abmessung [cm]	Fläche [cm ³]
Fokus 0,58	3,8 x 5,1	19,4
Fokus 1	2,3 x 3,0	6,9
Fokus 2	1,1 x 1,5	1,7

Tabelle 10: Vergleich der Messflächengrößen

Die aufgenommenen 3D-Bilder lassen sich mit Hilfe der ODSCAD-Software auswerten. Zur Auswertung werden die gewonnenen Bilder im Topographieauswertungsprogramm geöffnet. Das Programm ermöglicht die aufgenommene Oberfläche als ein farbcodiertes Höhenbild darzustellen. Bild 13 zeigt ein überführtes Live-Kamerabild in ein farbcodiertes Höhenbild.

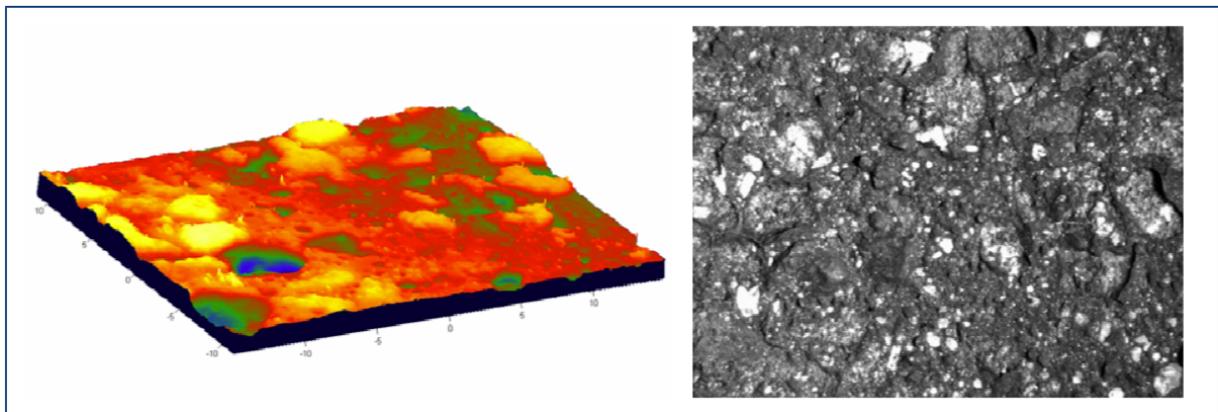


Bild 13: Gegenüberstellung des farbcodierten Höhenbild und dem Live-Kamerabild (GFM, 2008)

Zusätzlich besteht die Möglichkeit ein Schnittbild der Oberfläche zu erzeugen. Nachfolgendes Bild zeigt ein Schnittbild mit vertikaler Bemaßung. Hier wurde beispielsweise die Höhe der in der Mitte befindlichen Spitze bestimmt. Die Einheiten der Achsen des Schnittbildes können je nach Anforderung variiert werden.

Neben den vertikalen Abständen können auch die horizontalen Abstände sowie die Kurvenlänge entlang einer gemessenen Oberfläche dargestellt und ermittelt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, mehrere Schnittbilder miteinander zu vergleichen, indem mehrere Schnittbilder gleichzeitig in einem Layout erzeugt werden.

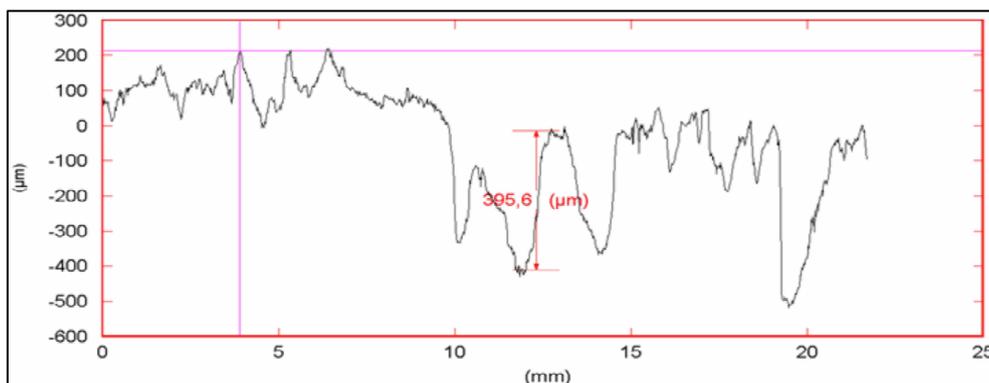


Bild 14: Schnittbild mit Bemaßung (GFM, 2008)

2.5 Ansprühen der Oberfläche

2.5.1 Auswahl Bitumenemulsion

Um die Auswirkung von Anstrichmittel auf den Schichtenverbund zu überprüfen und die Art und Menge der Beauftragung zu bestimmen, werden nach der ZTV Asphalt-StB zwei unterschiedliche Anstrichmittel aus Bitumenemulsion verwendet.

Die Bitumenemulsionen unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Massenanteile von Wasser und Bitumen. Zum einen wird die Emulsion C60BP4-S eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine kationische Emulsion mit 60 % Bitumenanteil, die durch ihre Kurzbezeichnung S für die Herstellung des Schichtenverbundes geeignet ist. Zum anderen wird eine 40-prozentige Bitumenemulsion eingesetzt. Die C40BF5-S ist eine kationische Bitumenemulsion mit mehr als 3 M.-% Fluxmittel und eignet sich ebenso für die Herstellung des Schichtenverbundes. Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Bitumenemulsionen sind in Tabelle 11 und 12 dargestellt.

Bestimmung an der Bitumenemulsion				
Merkmal	Prüfnorm	Einheit	Anforderung	Ergebnis
Brechverhalten	DIN EN 13075-1	-	110 bis 195	195
Bindemittelgehalt	DIN EN 1428	M.-%	58 bis 62	61
Ausflusszeit 2 mm / 40 °C	DIN EN 12846	s	15 bis 70	26
Siebrückstand 0,5 mm Sieb	DIN EN 1429	M.-%	≤ 0,5	0,01
Siebrückstand 7 d; 0,5 mm Sieb	DIN EN 1429	M.-%	≤ 0,5	0,01
Haftverhalten	DIN EN 13614	%	≥ 90	90
Bestimmung am rückgewonnenen Bindemittel				
Nadelpenetration	DIN EN 1426	0,1 mm	≤ 100	85
Erweichungspunkt Ring und Kugel	DIN EN 1427	°C	≥ 50	48,5
Elastische Rückstellung bei 10°C	DIN EN 13398	%	≥ 50	54
Bestimmung am rückgewonnenen und stabilisierten Bindemittel				
Nadelpenetration	DIN EN 1426	0,1 mm	DS	74
Erweichungspunkt Ring und Kugel	DIN EN 1427	°C	DS	50,8
Elastische Rückstellung bei 10°C	DIN EN 13398	%	DS	52

Tabelle 11: Eigenschaften C60BP4-S

Bestimmung an der Bitumenemulsion				
Merkmal	Prüfnorm	Einheit	Anforderung	Ergebnis
Brechverhalten	DIN EN 13075-1	-	> 170	212
Eindringfähigkeit	DIN EN 12849	min	DS	> 20
Bindemittelgehalt	DIN EN 1428	M.-%	38 bis 42	40
Ausflusszeit 2 mm / 40 °C	DIN EN 12846	s	≤ 20	16
Siebrückstand 0,5 mm Sieb	DIN EN 1429	M.-%	≤ 0,5	0,01
Siebrückstand 7 d; 0,5 mm Sieb	DIN EN 1429	M.-%	≤ 0,5	0,01
Haftverhalten	DIN EN 13614	%	≥ 75	75
Bestimmung am rückgewonnenen Bindemittel				
Nadelpenetration	DIN EN 1426	0,1 mm	≤ 220	135
Erweichungspunkt Ring und Kugel	DIN EN 1427	°C	≥ 35	43,6
Bestimmung am rückgewonnenen und stabilisierten Bindemittel				
Nadelpenetration	DIN EN 1426	0,1 mm	DS	60
Erweichungspunkt Ring und Kugel	DIN EN 1427	°C	DS	50,6

Tabelle 12: Eigenschaften C40BF5-S

2.5.2 Ansprühen der Probekörper

Die Bitumenemulsion soll gleichmäßig auf die Asphaltplatten aufgetragen werden. In früheren Forschungsarbeiten wurde die Bitumenemulsion mit einer Sprühflasche oder einem Pinsel aufgetragen. Dies bildet nicht die Realität ab und kann zu Verfälschungen der Ergebnisse führen. Da die Ergebnisse gezeigt haben, dass sich nur schwer ein gleichmäßiges Sprühbild erzielen lässt und ein Teil der abgewogenen Menge im Pinsel oder der Rolle hängen bleibt. Aus diesem Grund wurde für dieses Forschungsprojekt eine Ansprühanlage gebaut, mit der eine realitätsnahe Applikation der Bitumenemulsionen möglich ist. Die Entwicklung und Herstellung der Ansprühanlage wurde von der Firma Esha Straße GmbH durchgeführt.

In nachfolgenden Bildern ist die Ansprühanlage mit ihren Besonderheiten (Laufschiene, Düse) dargestellt.

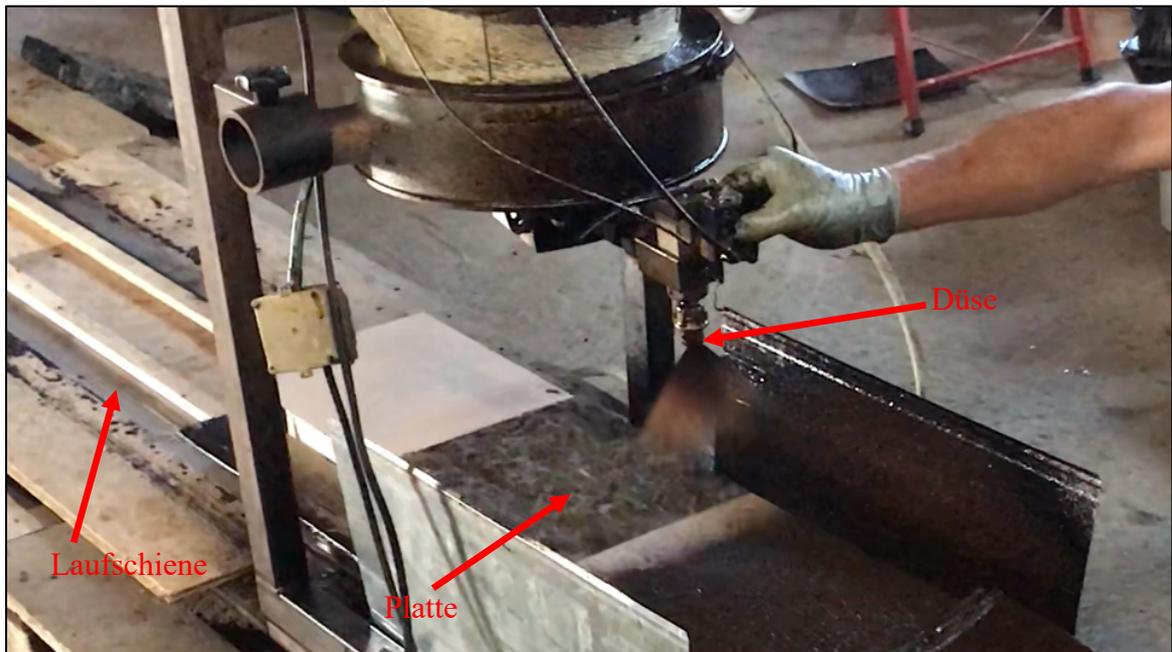


Bild 15: Aufbau der Ansprühanlage

In der Ansprühanlage werden die Platten auf ein motorbetriebenes Fließband gelegt und fahren unter einer Düse, die die Bitumenemulsion als feinen Nebel aufträgt, hindurch. Im Vergleich zu der Realität bewegt sich hierbei nicht die Ansprühvorrichtung (Düse), sondern der Asphaltbelag (Platte). Durch die Einstellung der Geschwindigkeit des Fließbandes, kann die applizierte Menge der Bitumenemulsion variiert werden. Die verwendete Düse entspricht den Düsen, die in der realen Baupraxis eingesetzt werden. Durch einen Adapter besteht die Möglichkeit verschiedene Düsentypen einzusetzen und weitere Untersuchungen mit variierenden Düsen vorzunehmen.

Zusätzlich kann für eine realitätsnahe Simulation des Ansprühvorganges der Düsendruck je nach Emulsion variiert werden. Das Ansprühmittel wird in einem Aufbewahrungskessel auf 70 °C temperiert und entspricht somit der Temperatur, welche im Sprühfertiger eingestellt wird. Der Vorgang der Applikation im Labormaßstab ist demzufolge dem Verfahren des Sprühfertigers in situ sehr ähnlich.

In den nachfolgenden Bildern ist die Ansprühanlage im Detail dargestellt.

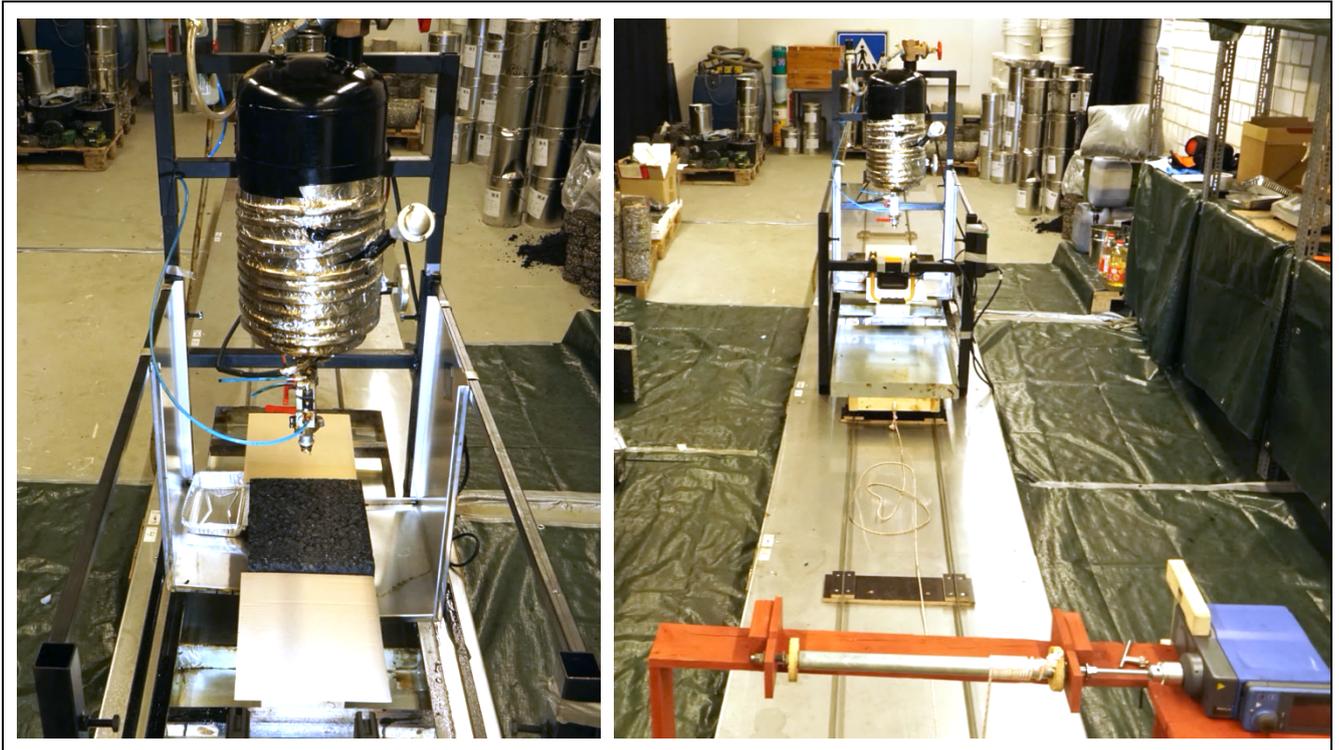


Bild 16: Ansprühanlage – Ansicht vorne mit Antriebskopf

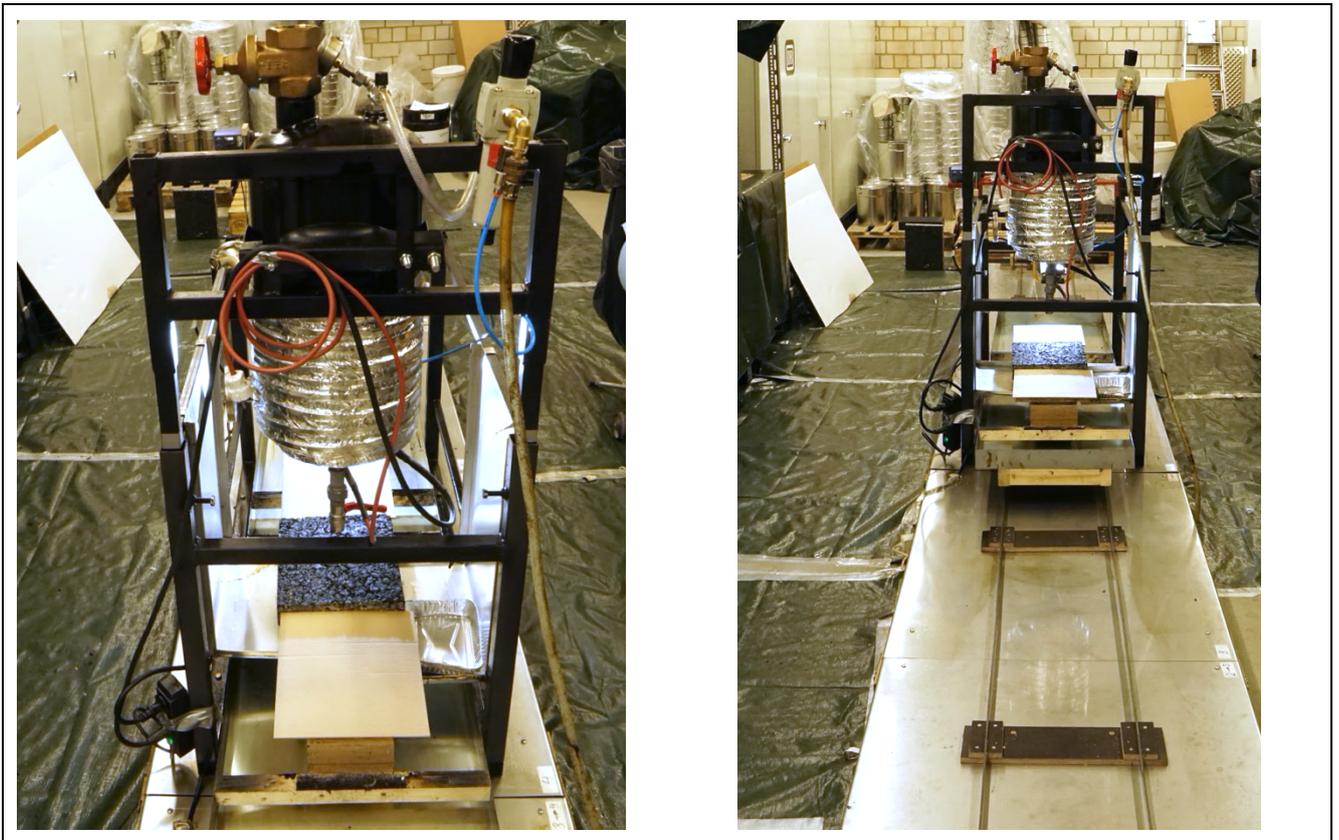


Bild 17: Ansprühanlage – Rückansicht mit Fahrgestell

2.5.3 Ansprühmengen und -art

Die Laboruntersuchungen sollen erste Aussagen und Empfehlungen für die nachfolgenden in situ Untersuchungen festlegen, aus diesem Grund werden unterschiedliche Ansprühmengen auf variierenden Unterlagen untersucht.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Varianten dargestellt, die im Labor untersucht wurden. Die Varianten weisen als Oberfläche sowohl gefräste als auch neu hergestellte Unterlagen auf.

Als Ansprühmengen werden die minimalen und maximalen Mengen entsprechend der Tabellen aus Kapitel 2.2.5 verwendet sowie jeweils der Mittelwert.

Bitumenemulsion	Unterlage (Beschaffenheit)	Aufzubringende Asphalterschicht	Dosierung (Ansprühmenge)
C60BP4-S	gefräste Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	200; 300; 400
C60BP4-S	neu hergestellte Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht	200; 300; 400

Tabelle 13: Ansprühmengen der Probekörper mit C60BP4-S

Bitumenemulsion	Unterlage (Beschaffenheit)	Aufzubringende Asphalterschicht	Dosierung (Ansprühmenge)
C40BF5-S	gefräste Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	200 bis 550
C40BF5-S	neu hergestellte Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht	200 bis 550

Tabelle 14: Ansprühmengen der Probekörper mit C40BF5-S

2.6 Untersuchung der Probekörper

2.6.1 Abscherversuch nach Leutner

Der Abscherversuch nach Leutner wird gemäß der TP Asphalt-StB Teil 80 Ausgabe 2012 durchgeführt. Für die Prüfung werden aus den hergestellten Probeplatten Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen. Zu prüfen sind zwei Bohrkerne je Entnahmestelle (TP Asphalt-StB Teil 80 , 2012).

Vor dem Beginn der Prüfung werden die Bohrkerne für mindestens 12 Stunden auf die Prüftemperatur von 20 ± 1 °C temperiert. Anschließend werden die temperierten Bohrkerne in das Schergerät eingesetzt. Der Abschervorgang erfolgt mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 ± 2 mm/min (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2012).

Als Ergebnis werden die maximale Scherkraft und der Scherweg nach TP Asphalt-StB Teil 80 ermittelt.

2.6.2 Untersuchungen am Bitumen

Für die aus den Emulsionen gewonnen Bitumina werden Standardlabortests durchgeführt, um die Qualität des im Ansprühmittel verwendeten Bitumens zu überprüfen. Dies ist von hoher Relevanz, da die Qualität des Bitumens einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Schichtenverbundes haben kann. Die durchgeführten Tests werden im Folgenden beschrieben.

2.6.2.1 Nadelpenetration nach DIN 1426

In dieser gängigen Methode wird eine Bitumenprobe bei 25°C mit einer Nadel für 5 Sekunden vertikal belastet. Die Belastung beträgt 100 g. Die Eindringtiefe in Zehntelmillimeter entspricht der Penetration und dient beim Umgang mit Bitumen auch der Klassifizierung. Die Penetration ist eine in der Praxis häufig angewandte Prüfmethode und beschreibt das Verhalten von Bitumen bei mittleren Temperaturen des Gebrauchsbereiches (DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2015a).

2.6.2.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 1427

In dieser Methode wird das Verhalten von Bitumen bei höheren Temperaturen des Gebrauchsbereiches geprüft. Dabei werden in Ringe gegossene Proben von einer Ausgangstemperatur von 5°C kontinuierlich erwärmt und dabei mit einer Stahlkugel belastet. Der Erweichungspunkt ist erreicht, wenn die Kugel durch die Erweichung des Bitumens das Bitumen taschenförmig verformt und die umhüllte Kugel den Boden des Messgefäßes erreicht bzw. den Lichtstrahl, der die Verformung überwacht, durchbricht. Der Erweichungspunkt wird in °C angegeben (DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2015b).

2.6.2.3 Elastische Rückstellung nach DIN 13398

Dieser Versuch dient der Feststellung des Rückstellungsverhalten von modifizierten Bitumina nach aufgebrachtener Dehnung. Ein Probekörper wird mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf eine Länge von 200 mm gedehnt. Ist dieser Prozess abgeschlossen wird der entstandene Faden in der Mitte durchgeschnitten und die Rückverformung des Bindemittels gemessen. Die Rückstellung wird als Prozentsatz der Dehnlänge angegeben (DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2017).

2.6.2.4 Bestimmung des komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels im DSR nach DIN 14770

In diesem Versuch wird die zu prüfende Bitumenprobe im DSR mit einer oszillierenden Schubspannung belastet, wobei die Schubverformung als Reaktion auf die Spannung gemessen wird. Der Quotient aus Schubspannung und Schubverzerrung ergibt das komplexe Schubmodul, das einen elastischen und einen viskosen Anteil besitzt. Diese Anteile lassen sich auch über den Phasenwinkel beschreiben, der ebenfalls mit dem DSR bestimmt werden kann. Dabei wird die Temperatur, bei welcher die Schubspannung aufgebracht wird, variiert (DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2012).

2.6.2.5 MSCR-Prüfung im DSR nach DIN 12593

In diesem Versuch wird das DSR im Rotationsmodus betrieben, das heißt, die im DSR befindliche Probe wird nicht oszillierend belastet, sondern nur in eine Drehrichtung. Dabei wird die Probe durch eine Schubspannung kurzzeitig belastet, um ihr danach Zeit zur Rückformung bzw. Erholung zu lassen. Nach der Rückformung wird die gleiche Schubspannung wie zuvor aufgebracht und der Zyklus wiederholt sich. Die Prüfung findet bei konstanter Temperatur, aber unter verschiedenen Belastungen statt. Durch diese Werte können das Kriechverhalten bei konstanter Spannung als Nachgiebigkeit und die bei Erholung anhand der durchschnittlichen Rückverformung bestimmt werden (DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2015c).

3.1 Verteilung der Bitumenemulsion

Die Verteilung der Bitumenemulsion wurde auf den verschiedenen Platten zunächst augenscheinlich eingeschätzt und durch Fotos dokumentiert. Zusätzlich wurde die Auftragsmenge messtechnisch mit dem optischen 3D-Messgerät „MikroCAD“ untersucht.

Die Fotos der jeweiligen Bitumenemulsion und Ansprühmenge sind in Bild 18 und Bild 19 abgedruckt. Anhand der Fotos ist zu erkennen, dass die Verteilung der Bitumenemulsion ungleichmäßig vorliegt. Nach dem Ansprühvorgang fließt die flüssige Bitumenemulsion auf einer gefrästen Fläche in die Frästäler, sodass sich die Bitumenemulsion in den Tälern sammelt und dort bricht.

Die beiden Bilder verdeutlichen, dass das beschriebene Verhalten bei allen Ansprühmengen eintritt.

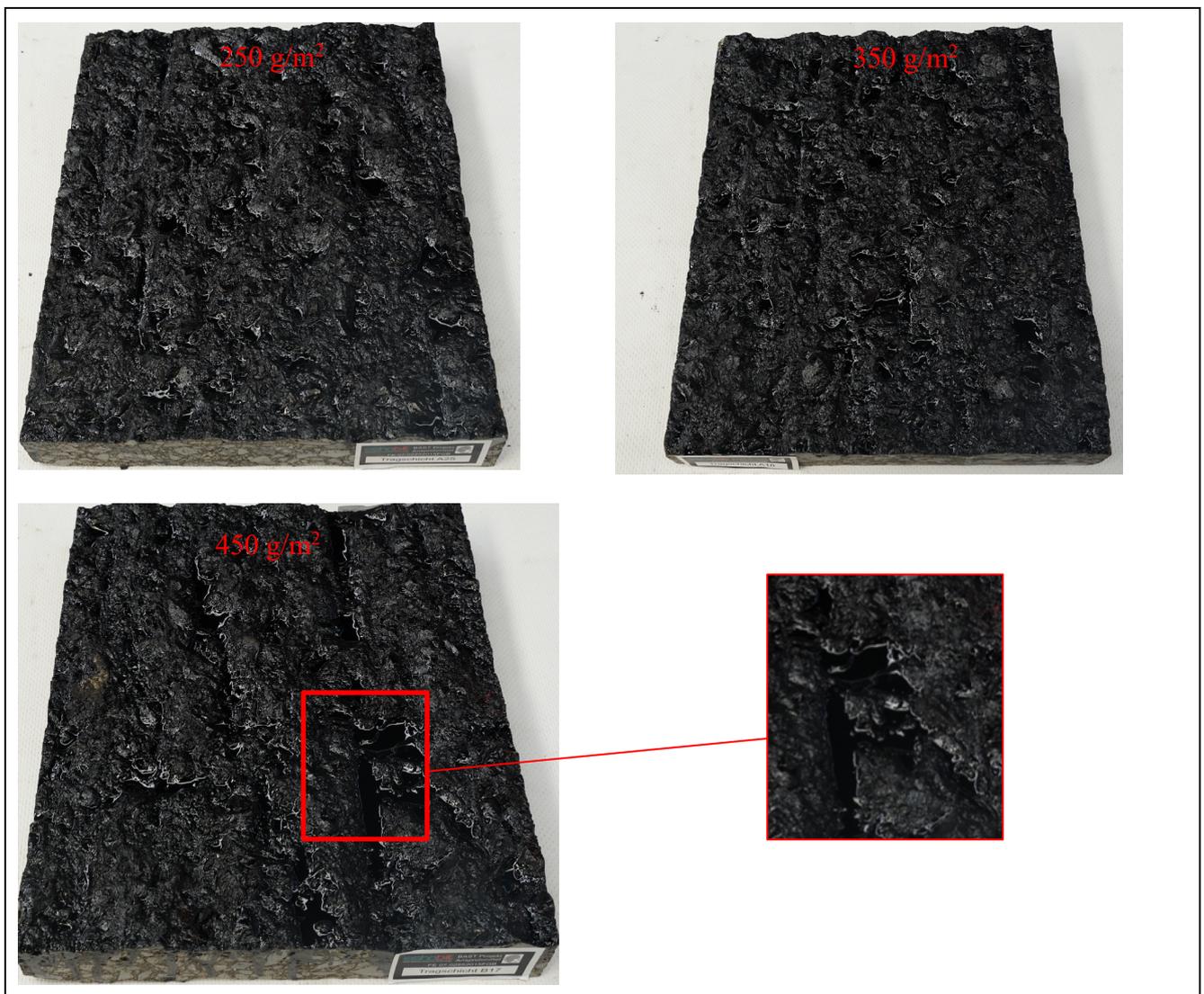


Bild 18: Verteilung Bitumenemulsion C40BF5-S

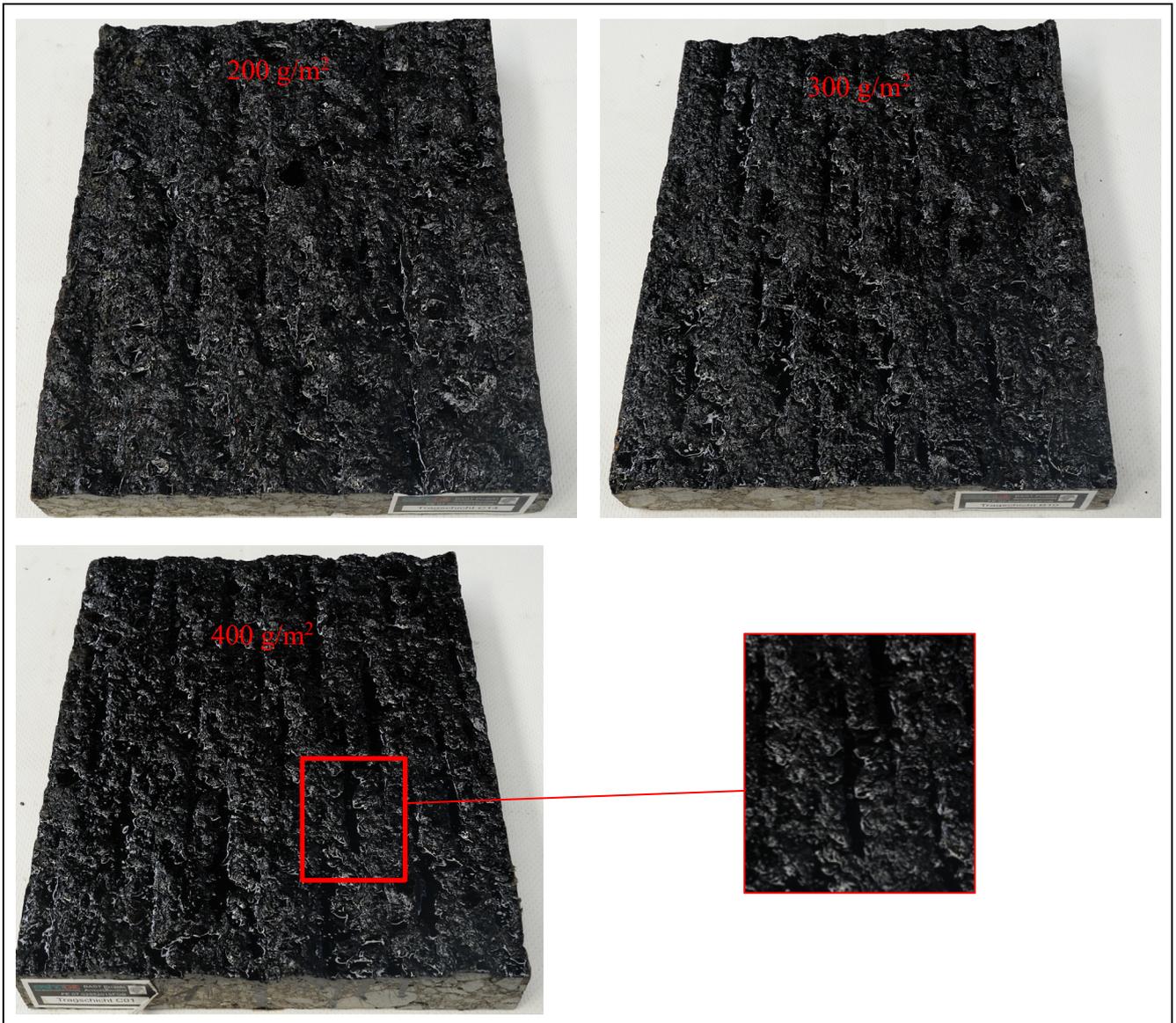


Bild 19: Verteilung Bitumenemulsion C60BP4-S

Für eine messtechnische Betrachtung der Verteilung der Bitumenemulsion wurden die Probeplatten sowohl vor als auch nach dem Applizieren der Bitumenemulsion mit dem optischen 3D Messgerät aufgenommen. Mit der ODSCAD-Software wurden die Aufnahmen des optischen 3D-Messgerätes „MikroCAD“ ausgewertet, wodurch eine genaue Verteilung der Bitumenemulsionen an der gleichen Stelle gemessen werden konnte.

Bild 20 zeigt exemplarisch die Verteilung der Bitumenemulsion einer Probenstelle. In Bild 20 ist die Verteilung der C40BF5-S mit einer Ansprühmenge von 250 g/m² dargestellt. Das Bild verdeutlicht die bereits augenscheinlich getroffene Erkenntnis, dass die Bitumenemulsion sich in den Tiefpunkten der Fraßspur nach dem Ansprühvorgang sammelt. Auf den Spitzen und Flanken der Fräsfläche bleibt nur eine geringe Menge Bitumen haften.

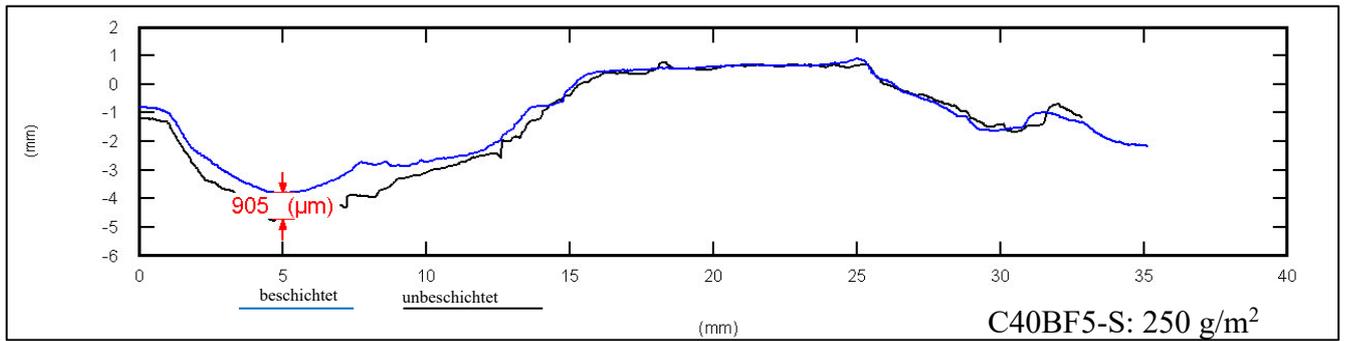


Bild 20: Messung der Verteilung der Bitumenemulsion

Das beschriebene Verhalten stellt sich sowohl bei der C40BF5-S Bitumenemulsion als auch bei der C60BP4-S Bitumenemulsion ein. Bei beiden Bitumenemulsion läuft die Bitumenemulsion nach dem Ansprühvorgang in den Tiefpunkten. Dies konnte sowohl bei den geringen als auch bei den hohen Ansprühmengen beobachtet werden.

3.2 Ansprühmenge

Die Ansprühmengen wurden durch das Wiegen der Platten vor und nach dem Ansprühvorgang bestimmt. Die Ergebnisse von beispielhaften Platten sind in Tabelle 15 und 16 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem verwendeten Verfahren eine sehr genaue Einstellung der Ansprühmengen möglich ist. Die Abweichungen zu den SOLL-Mengen sind nur geringfügig.

C60BP4-S								
Plattennr.	Oberfläche	SOLL [g/m ²]	IST [g/m ²]	Menge Platte [g]	je	Bitumenmenge [g/m ²]	Bitumen Platte [g]	je
A 15	gefräst	200,00	218,77	17,7		131,26	10,62	
B13	gefräst	300,00	305,29	24,7		183,17	14,82	
C01	gefräst	400,00	400,46	32,4		240,27	19,44	

Tabelle 15: Ansprühmengen C60BP4-S

C40BF5-S								
Plattennr.	Oberfläche	SOLL [g/m ²]	IST [g/m ²]	Menge Platte [g]	je	Bitumenmenge [g/m ²]	Bitumen Platte [g]	je
A20	gefräst	250,00	242,26	19,6		96,90	7,84	
A18	gefräst	350,00	336,19	27,2		134,48	10,88	
B17	gefräst	450,00	463,50	37,5		185,40	15,00	

Tabelle 16: Ansprühmengen C40BF5-S

Zusätzlich sind in Tabelle 15 und 16 die Bitumenmengen, die auf die Platten appliziert wurden für jede Bitumenemulsion aufgelistet. Hierbei wird deutlich, dass mit der C60BP4-S zwar geringere Mengen appliziert werden, aber deutlich mehr Bitumen aufgetragen wird.

Der Vergleich der geringen, mittleren und hohen Ansprühmengen der Bitumenemulsionen C40BF5-S und C60BP4-S zeigen, dass mit der C60BP4-S Bitumenemulsion in der Regel die 1,3-fache Bitumenmenge im Vergleich zu der C40BF5-S Bitumenemulsion aufgetragen wird.

3.3 Ergebnisse Abscherversuch nach Leutner

Die Ergebnisse des Abscherversuch nach Leutner werden in diesem Kapitel vorgestellt. Für die Untersuchung des Einflusses der Ansprühmengen wurden die Asphaltunterlagen mit verschiedenen Ansprühmengen je Bitumenemulsion appliziert.

In der ersten Versuchsreihe sind die beiden Ansprühmittel C40 BF5-S und C60 BP4-S eingesetzt wurden. Die gefrästen Probeplatten wurden dabei mit Ansprühmengen im Bereich von 200 g/m² bis 450 g/m² mit den Ansprühmitteln appliziert.

In Bild 21 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 in Abhängigkeit der Ansprühmenge dargestellt. Bei beiden Bitumenemulsionen erzielt die mittlere Ansprühmenge das schlechteste Ergebnis. Die geringe und hohe Ansprühmengen erzielt in beiden Fällen deutlich bessere Ergebnisse. Die Prüfkörper mit geringer und hoher Ansprühmenge weisen dabei fast die gleiche Scherkraft auf, wobei bei der geringeren Menge die Einzelwerte einer größeren Schwankung unterliegen.

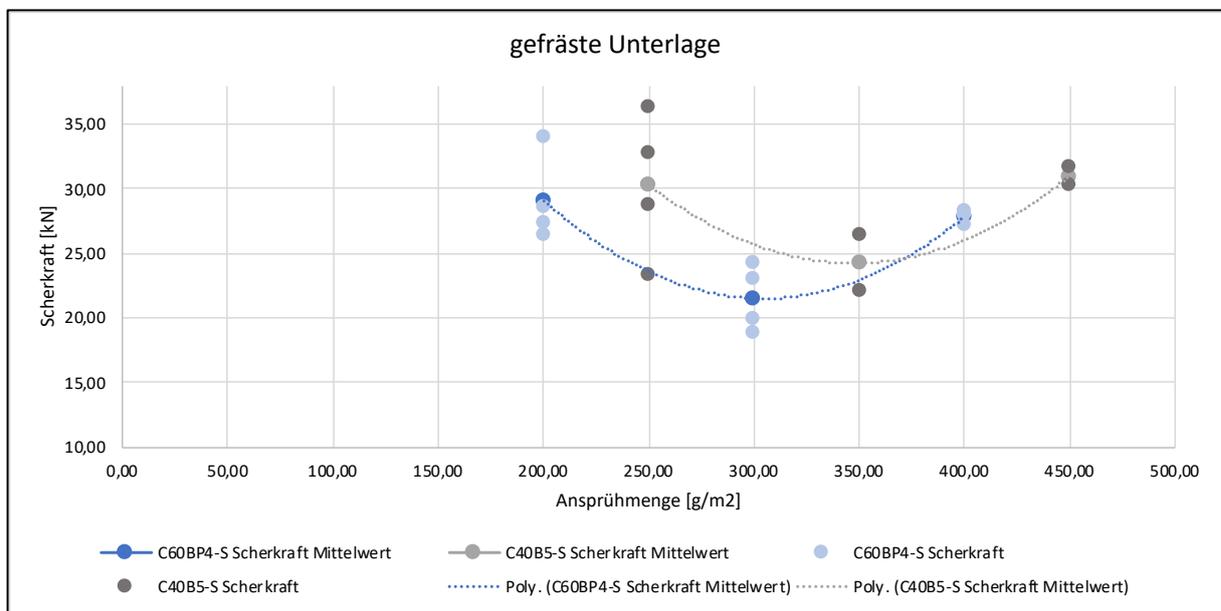


Bild 21: Ergebnisse Versuchsreihe 1 gefräste Unterlage je Ansprühmenge

Da durch die Bitumenemulsion C60BP4-S mehr Bitumen im Vergleich zu der Bitumenemulsion C40BF5-S appliziert wird, wurde in Bild 22 die Bitumenmengen miteinander verglichen.

Hierbei fällt auf, dass mit der C40BF5-S Emulsion bei einer Bitumenmenge von 180 g/m² höhere Scherkräfte erreicht als im Vergleich zur C60BP4-S bei einer Bitumenmenge von 180 g/m².

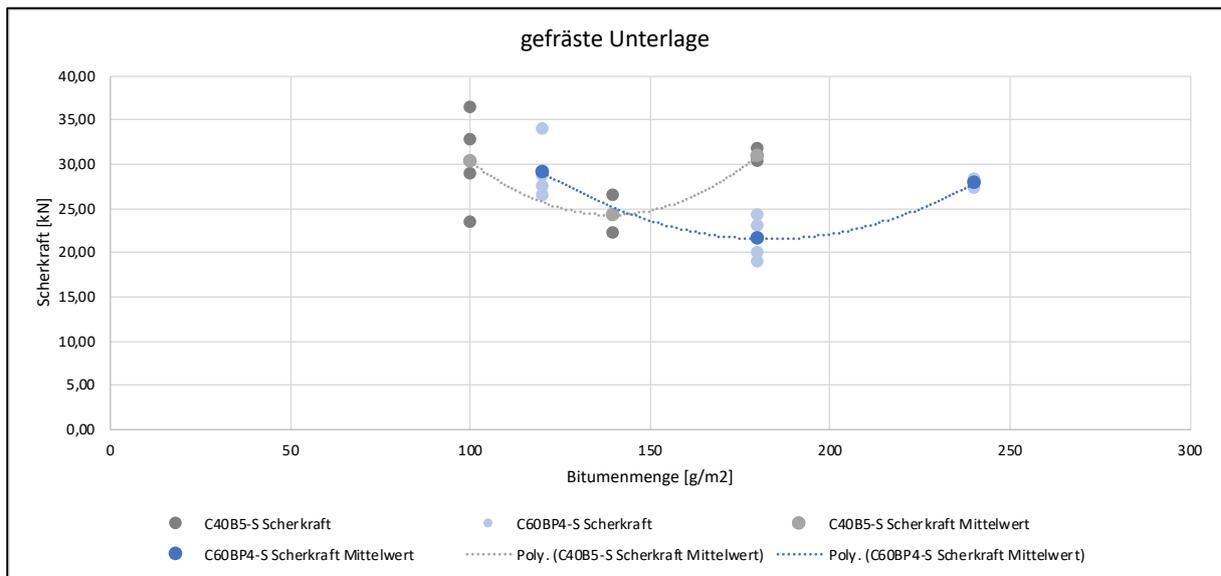


Bild 22: Ergebnisse Versuchsreihe 1 gefräste Unterlage je Bitumenmenge

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Versuche mit der Bitumenemulsion C40 BF5-S wiederholt. Neben den identischen Ansprühmengen zur Versuchsreihe 1 wurden noch höhere und geringere Ansprühmengen appliziert, sodass der Bereich der Ansprühmengen zwischen 200 g/m² und 550 g/m² liegt. Durch die große Breite soll der Einfluss der Ansprühmengen auf die Scherwerte genauer nachvollzogen werden können.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 sind in Bild 23 dargestellt. Die Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 wieder. Insgesamt liegen die Ergebnisse in einem sehr hohen Bereich und lassen auf einen guten Schichtenverbund schließen, dennoch lassen sich anhand der Ergebnisse Unterschiede zwischen den Ansprühmengen erkennen. Im Bereich der mittleren Ansprühmengen (300 g/m²) sinkt die Scherkraft minimal. Steigt dann wieder an und fällt bei 450g/m² wieder ab. Es bildet sich ein Wellenverlauf aus.

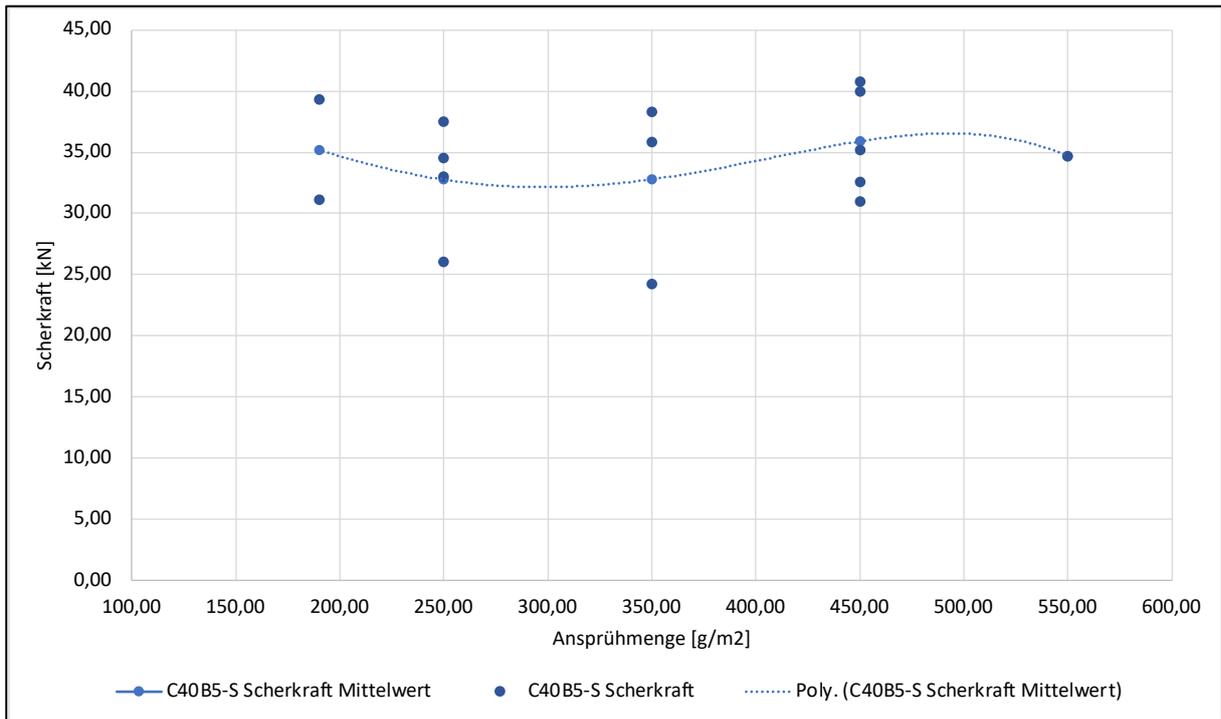


Bild 23: Ergebnisse Versuchsreihe 2 gefräste Unterlage je Ansprühmenge

In der Versuchsreihe 3 wurden neu hergestellte Unterlagen eingesetzt. Hier wurden ebenfalls Ansprühmengen in einem großen Spannungsbereich aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Bild 24 dargestellt. Anders als bei den Versuchen mit der gefrästen Unterlage als Probekörper weisen hier die mittleren und hohen Ansprühmengen die besseren Scherkräfte auf. Es ist ebenfalls ein wellenförmiger Verlauf der Ergebnisse im Diagramm zu erkennen.

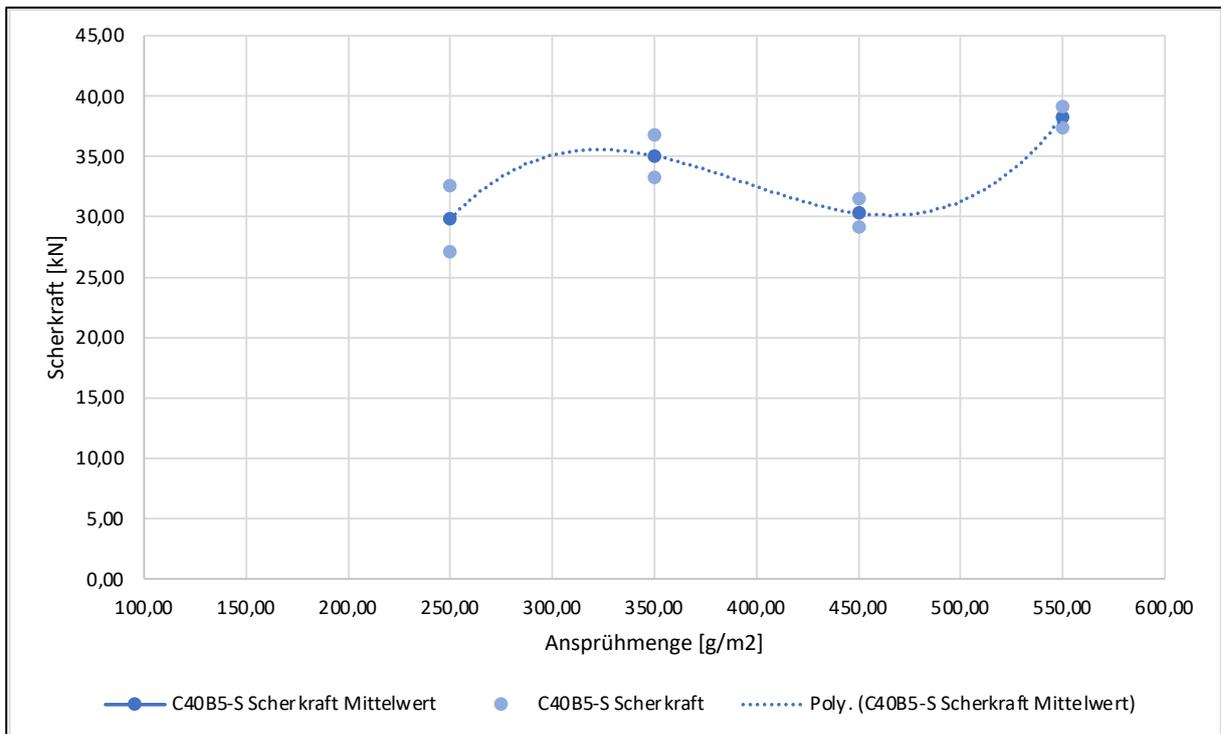


Bild 24: Ergebnisse Versuchsreihe 3 neu hergestellte Unterlage je Ansprühmenge

Nach dem Abscherversuch wurden die Bohrkern an den Scherflächen getrennt, damit die Bruchfläche analysiert werden konnte. In Bild 25 ist die Scherfläche eines Bohrkerns exemplarisch dargestellt. Bei Betrachtung der Scherfläche lässt sich feststellen, dass der Verbund an der Anstrichfläche versagt. Das Versagen innerhalb der Anstrichfläche tritt bei allen Anstrichmengen und Bitumenemulsion ein.



Bild 25: Scherfläche Bohrkern

3.4 Ergebnisse der Bitumenversuche

3.4.1 Ergebnisse der Standardversuche

In Tabelle 17 und 18 sind die Ergebnisse der Standardversuche Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel und elastische Rückstellung der Bitumenemulsionen C60 BP4-S und C40 BF5-S zusammengefasst.

Bei dem Bitumen aus der Emulsion C60BP4-S handelt es sich um eine polymermodifiziertes Bitumen. Bei der Bitumenemulsion C40 BF5-S wird hingegen ein Standardbitumen eingesetzt.

C60BP4-S	
Erweichungspunkt Ring und Kugel	48,5 °C
Penetration	85 1/10 mm
elastische Rückstellung	54 %

Tabelle 17: Ergebnisse Standardversuche C60 BP4-S

C40 BF5-S	
Erweichungspunkt Ring und Kugel	43,6 °C
Penetration	135 1/10 mm
elastische Rückstellung	-

Tabelle 18: Ergebnisse Standardversuche C40 BF5-S

3.4.2 Ergebnisse der Untersuchungen im DSR (Temp-Sweep)

Die Ergebnisse aus dem DSR sind in den nachfolgenden Bild 26, Bild 27 und Bild 28 zu sehen. Die Versuche mit dem DSR wurden durchgeführt, um die Eigenschaften der Bitumenemulsionen und dem darin enthaltenen Bitumen bei unterschiedlichen Temperaturen zu prüfen.

Aus den Bildern ist zu entnehmen, dass das Bitumen aus der Emulsion C60BP4-S grundsätzlich steifer als das Bitumen aus der Emulsion C40BF5-S.

In Bild 26 ist zu erkennen, dass der komplexe Schubmodul der C60BP4-S bei jeder Temperatur größer ist als das der C40BF5-S. Dabei ist der Schubmodul der C60BP4-S fast durchgehend doppelt so hoch, was durch die logarithmische Skalierung der Ordinate etwas kaschiert wird. Das Bindemittel aus der Emulsion C60BP4-S ist also deutlich steifer als das Bindemittel aus der Emulsion C40BF5-S.

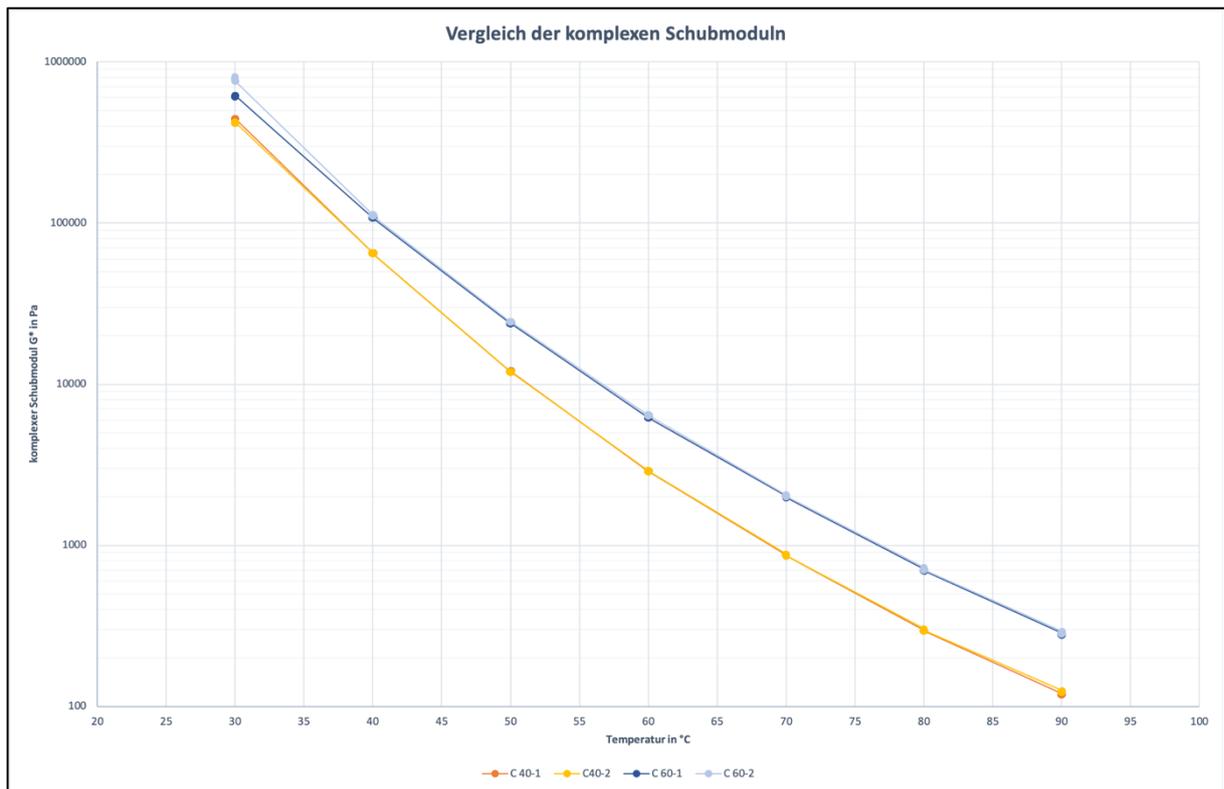


Bild 26: Vergleich der komplexen Schubmoduln von C60 BP4-S und C40 BF5-S

In Bild 27 ist zu sehen, dass der Phasenwinkel der Emulsion C60BP4-S geringer ist als der der Emulsion C40BF5-S. Der Unterschied im Phasenwinkel beträgt zwischen 10° bei 30°C bis zu 3° bei 90°C . Es lässt sich also schließen, dass das Bindemittel aus der Emulsion C60BP4-S eher elastisch reagiert als das Bindemittel C40BF5-S.

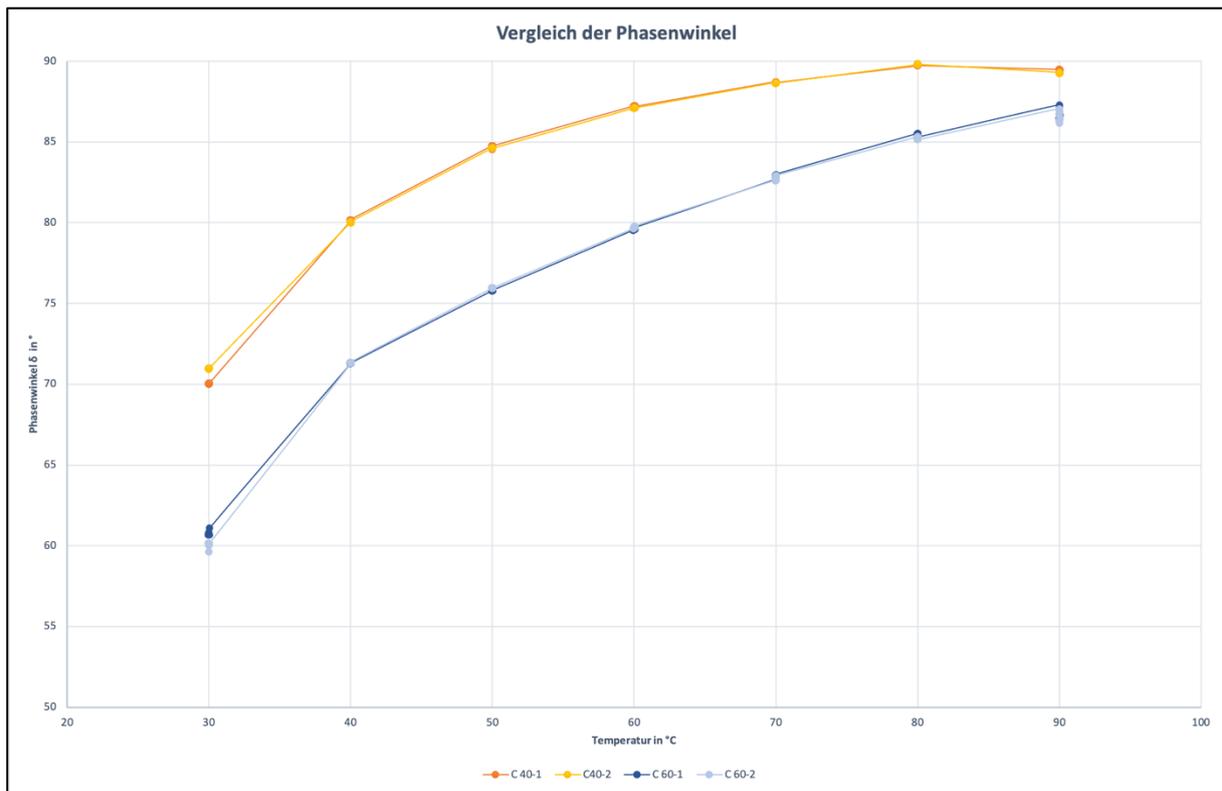


Bild 27: Vergleich der Phasenwinkel von C60 BP4-S und C40 BF5-S

Die beschriebenen Zusammenhänge werden nochmals durch das Black-Diagramm in Bild 28 beschrieben. Das Bitumen aus der Emulsion C60BP4-S ist zum einen bei gleichem Phasenwinkel steifer und reagiert bei gleichem Schubmodul eher elastisch als das Bitumen aus der Emulsion C40BF5-S.

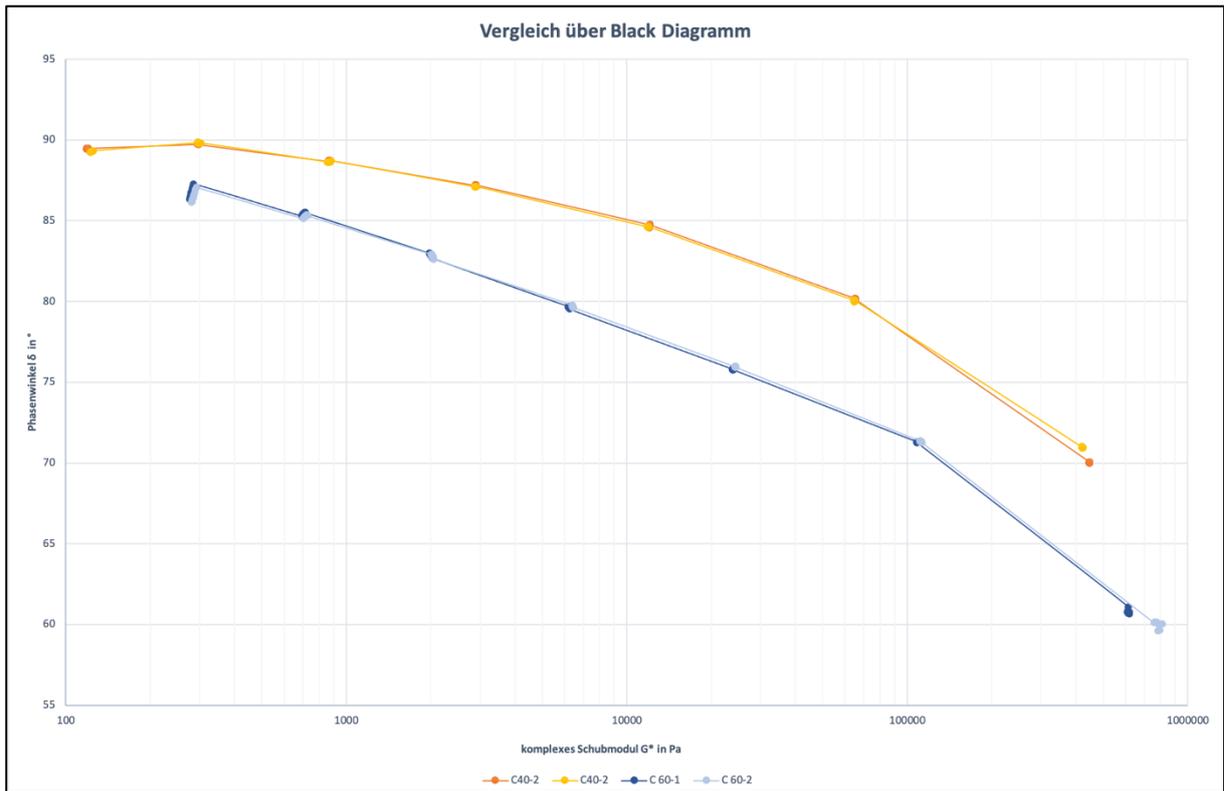


Bild 28: Black Diagramm von C60 BP4-S und C40 BF5-S

4.1 Definition der Varianten

Um zu genauen Erkenntnissen über die Ansprühmengen für die Bitumenemulsion C60BP4-S und C40B5-S in situ zu erlangen, wurden Varianten für die Parameterstudie mit der Hilfe des Betreuerkreises ausgearbeitet. Die Varianten unterscheiden sich in der Art der Unterlage (gefräst; neu hergestellt) und dem Aufbau der Asphaltkonstruktion. Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den verschiedenen Varianten, sollen Empfehlungen für die zukünftige Anwendung von Ansprühmitteln auf unterschiedlichen Oberflächen und für unterschiedliche Asphaltkonstruktionen verfasst werden. Der Einbau soll hierbei konventionell erfolgen.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Varianten grafisch dargestellt, die in der Parameterstudie überprüft werden sollen.

Variante 1

- gefräste ATS mit neu herzustellender ABS / ADS
 - verschiedene Oberflächentextur der Unterlage (gut vs. schlecht)
 - Erfassung der Oberflächentemperatur bei Aufbringen des Ansprühmittels mittels Infrarotkamera
 - Variieren der Bitumenemulsionen (C60BP4-S, C40B5-S und ggf. Sonderemulsion)

Variante 2

- gefräste ABS mit neu herzustellender ABS / ADS
 - verschiedene Oberflächentextur der Unterlage (gut vs. schlecht)
 - Erfassung der Oberflächentemperatur bei Aufbringen des Ansprühmittels mittels Infrarotkamera
 - Variieren der Bitumenemulsionen (C60BP4-S, C40B5-S und ggf. Sonderemulsion)

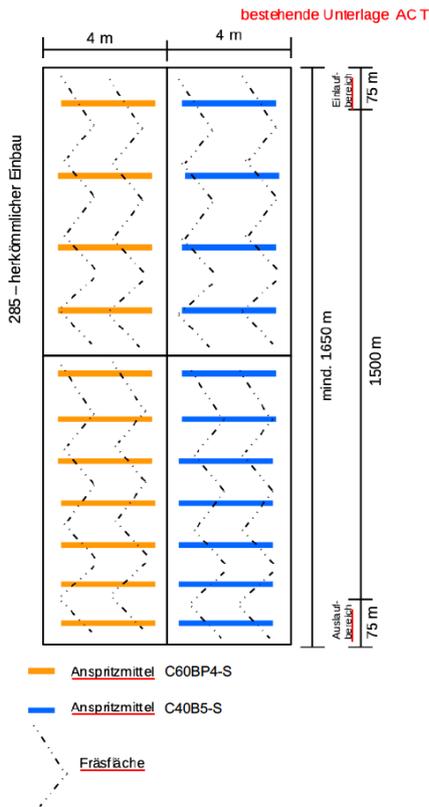
Variante 3

- neu hergestellte ATS mit neu herzustellender ABS
 - verschiedene Oberflächentextur der Unterlage (gut vs. schlecht)
 - Erfassung der Oberflächentemperatur bei Aufbringen des Ansprühmittels mittels Infrarotkamera
 - Variieren der Bitumenemulsionen (C60BP4-S, C40B5-S und ggf. Sonderemulsion)

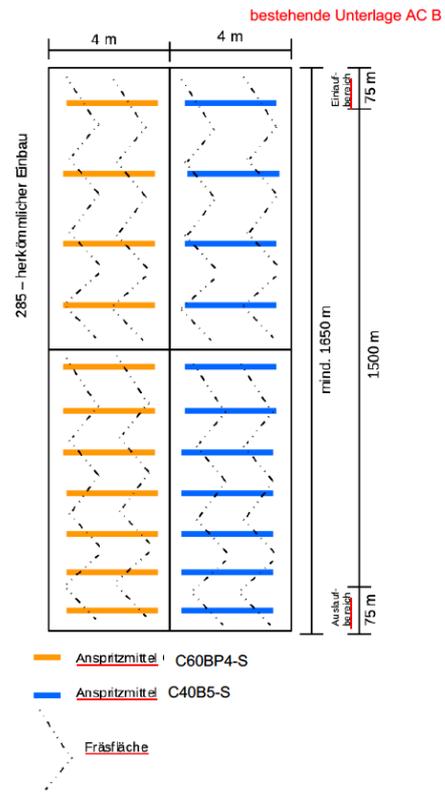
Variante 4

- neu hergestellte ABS mit neu herzustellender ADS
 - verschiedene Oberflächentextur der Unterlage (gut vs. schlecht)
 - Erfassung der Oberflächentemperatur bei Aufbringen des Ansprühmittels mittels Infrarotkamera
 - Variieren der Bitumenemulsionen (C60BP4-S, C40B5-S und ggf. Sonderemulsion)

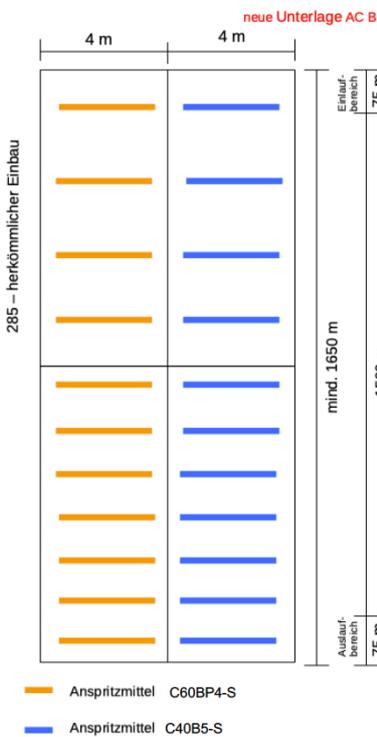
Variante 1



Variante 2



Variante 3



Variante 4

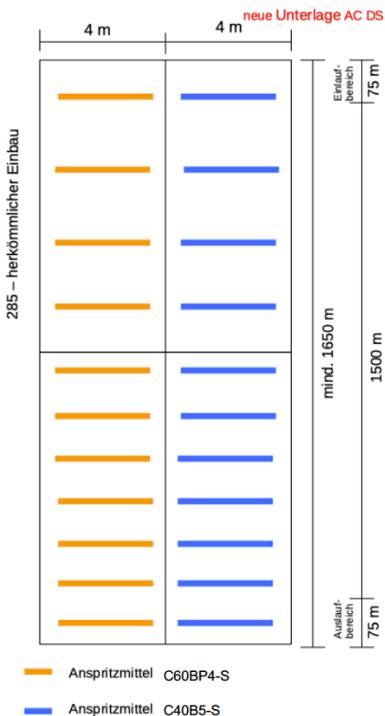


Bild 29: Darstellung der Varianten

4.2 Versuchsstrecken

Für die Überprüfung der verschiedenen Ansprühmengen und Bitumenemulsionen gemäß Tabelle 3 und 4 aus Kapitel 1.3.9 wurden Versuchsstrecken in Zusammenarbeit mit den Straßenbauämtern der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg ausgewählt. Die Versuchsstrecken unterscheiden sich dabei jeweils im Aufbau und der Oberfläche der Unterlage, sowie in der Ansprühmenge der Bitumenemulsion.

Als Bitumenemulsion werden die beiden Emulsionen C60BP4-S und C40B5-S eingesetzt (Zusammensetzung siehe: Kapitel 2.5.1). Anders als in den Laborversuchen wurde in den Teststrecken eine C40 B5-S eingesetzt, die im Vergleich zu der C40 BF5-S einen geringeren Fluxmittelanteil aufweist. Nach Rücksprache mit dem Betreuerkreis hat dies keine großen Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Labor und Baumaßnahme.

Versuchsstrecke	Aufbau	Belagstyp	Emulsion	Aufsprühmenge [g/m ²]
B 420 Fürfeld (Rheinland-Pfalz)	Asphaltbinderschicht: AC 16 BS Asphaltdeckschicht: AC 11 DS	gefräste AC TS neu hergestellte AC BS	C40B5-S	250 – 450 200 – 400
B 48 Alsenz (Rheinland-Pfalz)	Asphaltdeckschicht: AC 11 N	gefräste AC TS	C60BP4-S; C40B5-S	250 250
L 211 Bad Urach- Grabenstetten (Baden- Württemberg)	Asphaltbinderschicht: AC 16 BN Asphaltdeckschicht: AC 11 DN	gefräste AC TS neu hergestellte AC TN neu hergestellte AC BN	C60BP4-S C40B5-S	300 350 400
B 10 Münchweiler (Rheinland-Pfalz)	Asphaltbinderschicht: AC 16 BS Asphaltdeckschicht: SMA 8 DS	gefräste AC TS neu hergestellte AC BS	C60BP4-S C40B5-S	200-450 200-450
B 19 Künzelsau (Baden- Württemberg)	Asphaltbinderschicht: AC 16 BS Asphaltdeckschicht: AC 8 DS	neu hergestellte AC TS neu hergestellte AC BS	C60BP4-S	300

Tabelle 19: Varianten der Versuchsstrecken

4.2.1 Fürfeld B 420; Rheinland-Pfalz

In der Maßnahme B 420 Fürfeld wurde die Bitumenemulsionen C40BF5-S mit verschiedenen Ansprühmengen auf verschiedenen Unterlagen eingesetzt. Die verschiedenen Abschnitte haben jeweils eine Länge von 700 m.

Die gefräste Asphalttragschicht wurde vor dem Einbau der Asphaltbinderschicht mit folgenden Mengen und Bitumenemulsionen angesprüht:

- Abschnitt 1: C40B5-S, Menge 300 g/m²
- Abschnitt 2: C40B5-S, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 3: C40B5-S, Menge 450 g/m²
- Abschnitt 4: C40B5-S, Menge 350 g/m²

Nach dem Einbau der Asphaltbinderschicht wurde diese vor dem Einbau der Asphaltdeckschicht mit folgenden Mengen angesprüht:

- Abschnitt 1: C40B5-S, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 2: C40B5-S, Menge 200 g/m²
- Abschnitt 3: C40B5-S, Menge 400 g/m²
- Abschnitt 4: C40B5-S, Menge 300 g/m²

Der Verlauf der Maßnahme ist in Bild 30 dargestellt.

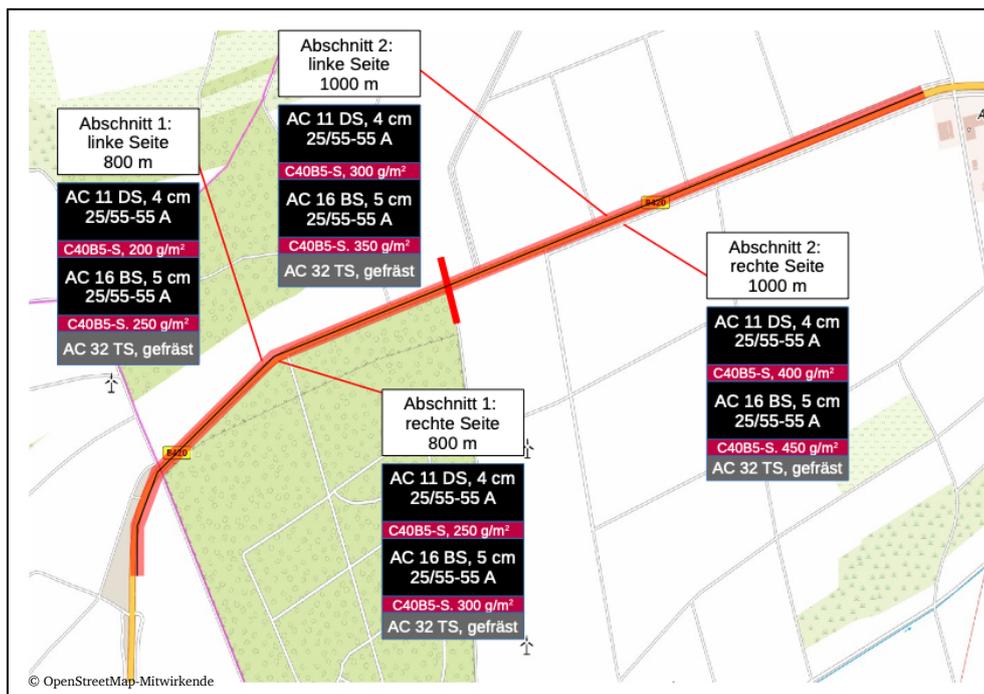


Bild 30: Baumaßnahme B420 Fürfeld

In Bild 31 ist die Asphaltbinderschicht dargestellt. Im linken Bereich des Bildes ist die Asphaltbinderschicht bereits angesprüht, im rechten Bereich ist sie noch unbehandelt. Zusätzlich ist auf dem Bild zu erkennen, dass viel Schmutz (Laub und Fahrdreck) auf der Unterlage vorhanden ist.



Bild 31: Vergleich angesprühter Bereich (links) und nicht angesprühter Bereich (rechts)

4.2.2 Umgehung Alsenz B 48; Rheinland-Pfalz

Die Maßnahme B 48 Alsenz umfasste den Einbau einer Asphaltdeckschicht AC 11 DN auf einer gefrästen Asphalttragschicht. Für das Forschungsprojekt wurde die Maßnahme in zwei Teilabschnitte unterteilt. Die zwei Teilabschnitten wurden mit den Ansprühmitteln C40B5-S und C60BP4-S und einer Ansprühmenge von 250 g/m^2 angesprüht.

Bild 32 stellt schematisch den Verlauf der Versuchsstrecke da. In dem Abschnitt zwischen Kilometer 1+000 und 2+100 wurde die Abschnitte für das Forschungsprojekt hergestellt. Die Abschnitte haben dabei eine Länge von jeweils 500 m.

Die Maßnahme enthält zudem Abschnitte, die für das Forschungsvorhaben FE 07.300/2018/LGB verwendet wurden.

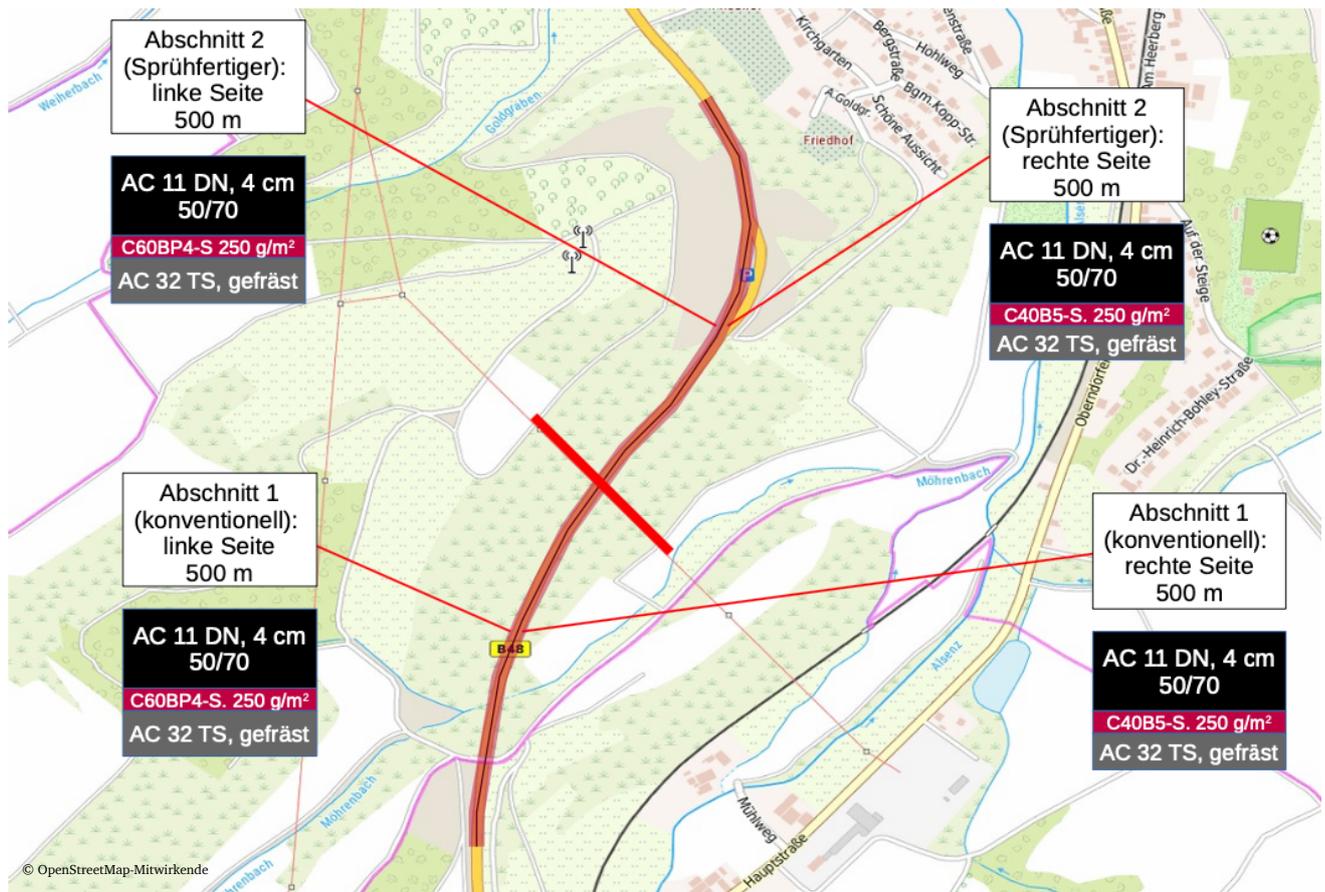


Bild 32: Baumaßnahme B 48 Umgehung Alsenz

In Bild 33 ist das Fräsbild der Maßnahme dargestellt.

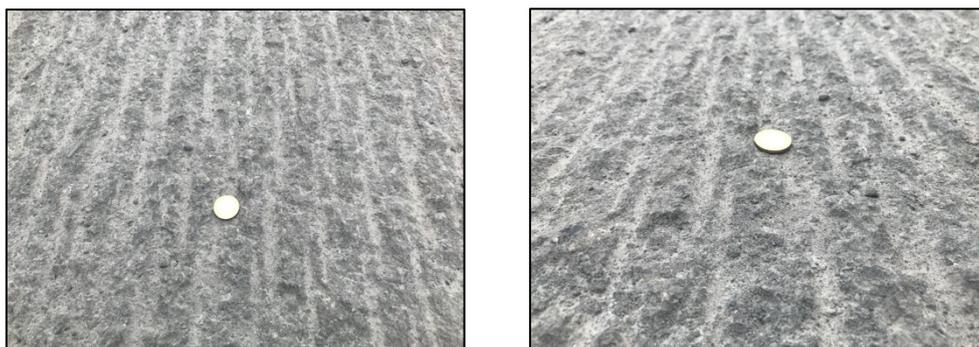


Bild 33: Fräsfläche B 48 Umgehung Alsenz

Der Einbau der Asphaltdeckschicht erfolgte mit zwei Sprühfertiger mit ausgeschalteter Sprühhvorrichtung, die nebeneinander eingebaut haben. In Bild 34 ist der Einbau mit den beiden Fertigern dargestellt.



Bild 34: Einbau B48 Umgehung Alsenz

4.2.3 Bad Urach-Grabenstetten L 211; Baden-Württemberg

In der Maßnahme L 211 bei Bad Urach-Grabenstetten wurden die beiden Bitumenemulsion C40 B5-S und C60 BP4-S mit unterschiedlichen Ansprühmengen für Vergleichszwecke eingesetzt.

Die Maßnahme besteht insgesamt aus drei Teilabschnitten. Für das Forschungsprojekt wurde der Teilabschnitt 2 mit den beiden Ansprühmittel und verschiedenen Ansprühmengen ausgeführt. In Bild 35 ist die Maßnahme dargestellt.

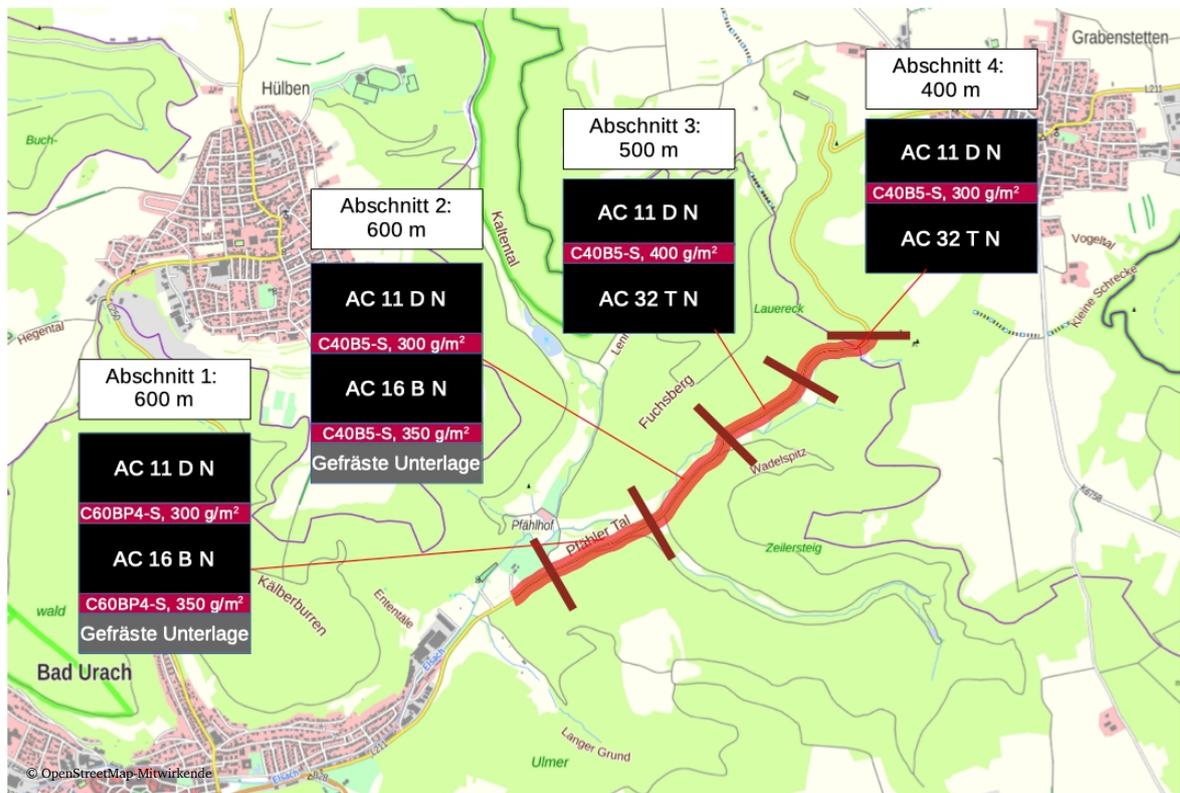


Bild 35: Baumaßnahme L211 Bad Urach-Grabenstetten

Die Maßnahme in Bad Urach-Grabenstetten wurde kurz vor dem Ende des Forschungsprojektes ausgeführt. Aus diesem Grund wurden aus dieser Maßnahme nur Bohrkern entnommen und untersucht. Weitere Untersuchungen (FWD-Messungen, etc.) konnten aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht durchgeführt werden.

4.2.4 Münchweiler B 10; Rheinland-Pfalz

4.2.4.1 Beschreibung der Maßnahme

In der Maßnahme auf der B 10 zwischen der Anschlussstelle Münchweiler a.d. Rodalb und der Grünbrücke zwischen Ruppertsweiler und Hinterweidenthal in Fahrtrichtung Landau wurde eine Asphaltbinderschicht AC 16 S auf einer gefrästen Tragschicht und eine Asphaltdeckschicht SMA 8 S auf die neu hergestellte Binderschicht eingebaut. Die Gesamtlänge der Maßnahme betrug in etwa 3.000 m. Es wurden sowohl die C60BP4-S als auch die C40B5-S eingesetzt. Um die Auswirkung beider Emulsionen auf den Schichtenverbund überprüfen zu können, wurde die Strecke zuerst in vier Abschnitte eingeteilt.

Es ergab sich bei dieser Baumaßnahme die Gelegenheit, eine Kalkmilch zum Schutz der angesprühnten Fläche einzusetzen. Das Gemisch aus Kalk und Wasser wird nach dem Auftragen und dem Brechvorgang der Bitumenemulsion aufgesprüht, wobei das Auftragen hier mit dem gleichen Ansprühwagen erfolgen konnte (siehe Bild 36). Die Kalkmilch trocknet anschließend und soll danach als Schutzschicht für die bereits gebrochene Emulsion dienen.

Da der Einsatz der Kalkmilch kein Bestandteil der Leistungsbeschreibung des Forschungsprojektes ist, sind die Ergebnisse im Anhang dargestellt.



Bild 36: Applikation der Kalkmilch

Für den Schichtenverbund zwischen gefräster Tragschicht und Binderschicht ergaben sich in Baurichtung folgende Abschnitte

- Abschnitt 1: Länge 300 m, C60BP4-S, Menge 450 g/m²
- Abschnitt 2: Länge 300 m, C60BP4-S, Menge 450 g/m², mit Kalkmilch, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 3: Länge 500 m, C60BP4-S, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 4: Länge 500 m, C60BP4-S, Menge 250 g/m², mit Kalkmilch, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 5: Länge 500 m, C40B5-S, Menge 450 g/m²
- Abschnitt 6: Länge 500 m, C40B5-S, Menge 250 g/m²

Für den Schichtenverbund zwischen neu hergestellter Binderschicht und Deckschicht ergaben sich in Baurichtung folgende Abschnitte

- Abschnitt 1: Länge 300 m, C60BP4-S, Menge 300 g/m²
- Abschnitt 2: Länge 300 m, C60BP4-S, Menge 300 g/m², mit Kalkmilch, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 3: Länge 500 m, C60BP4-S, Menge 200 g/m²
- Abschnitt 4: Länge 500 m, C60BP4-S, Menge 200 g/m², mit Kalkmilch, Menge 250 g/m²
- Abschnitt 5: Länge 500 m, C40B5-S, Menge 300 g/m²
- Abschnitt 6: Länge 500 m, C40B5-S, Menge 200 g/m²

Das Abschnittskonzept ist auch in Bild 37 zusammenfassend dargestellt.

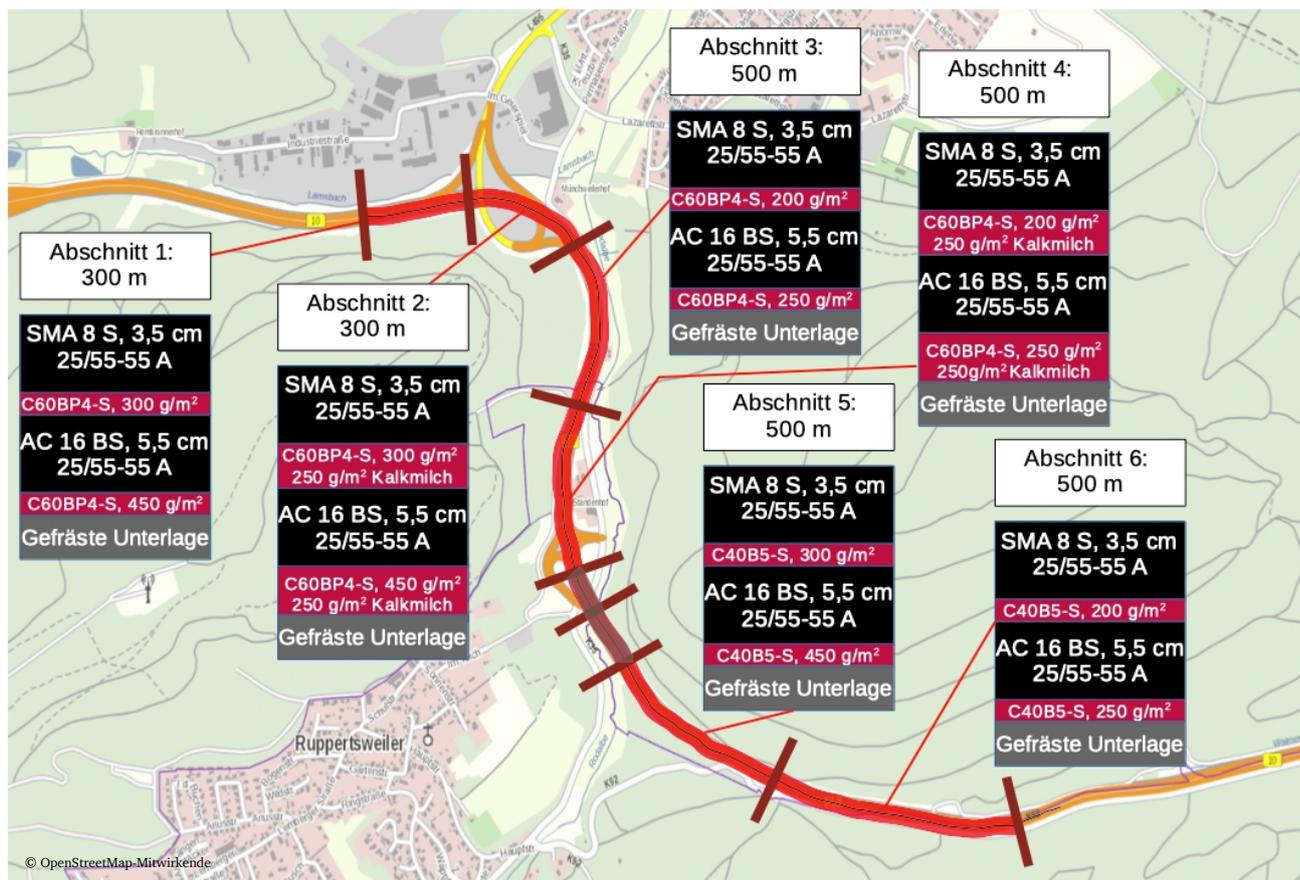


Bild 37: Baumaßnahme B10 Münchweiler

Es sei hierbei angemerkt, dass auf dem Brückenbauwerk zwischen den Baukilometern 1+320 und 1+218 sowie auf dem dem Bauablauf geschuldeten „Pufferabschnitt“ zwischen den Baukilometern 1+218 und 1+000 keine Untersuchungen durchgeführt wurden.

4.2.5 Künzelsau B 19; Baden-Württemberg

In der Maßnahme B19 Künzelsau wurde ein Vollausbau ausgeführt, das heißt, auf eine Schottertragschicht wurde eine neue Asphalttragschicht, eine neue Asphaltbinderschicht und eine neue Asphaltdeckschicht eingebaut. Für die Herstellung des Schichtenverbundes wurde sowohl für den Verbund zwischen ATS und ABS als auch für den Verbund zwischen ABS und ADS 300 g/m² der Emulsion C60BP4-S verwendet. Die Länge der Baumaßnahme betrug ca. 1000 m.

Auch hier wurden zur Bewertung der Tragfähigkeit FWD-Messungen durchgeführt. Die erste FWD-Messung wurde auf der Schottertragschicht durchgeführt, die zweite auf der fertigen Asphaltdeckschicht. Zur Bewertung des Schichtenverbundes nach Leutner wurden an zwei Stationen der Maßnahme jeweils zwei Bohrkerne gezogen. In Bild 38 ist der Verlauf der Maßnahme dargestellt.

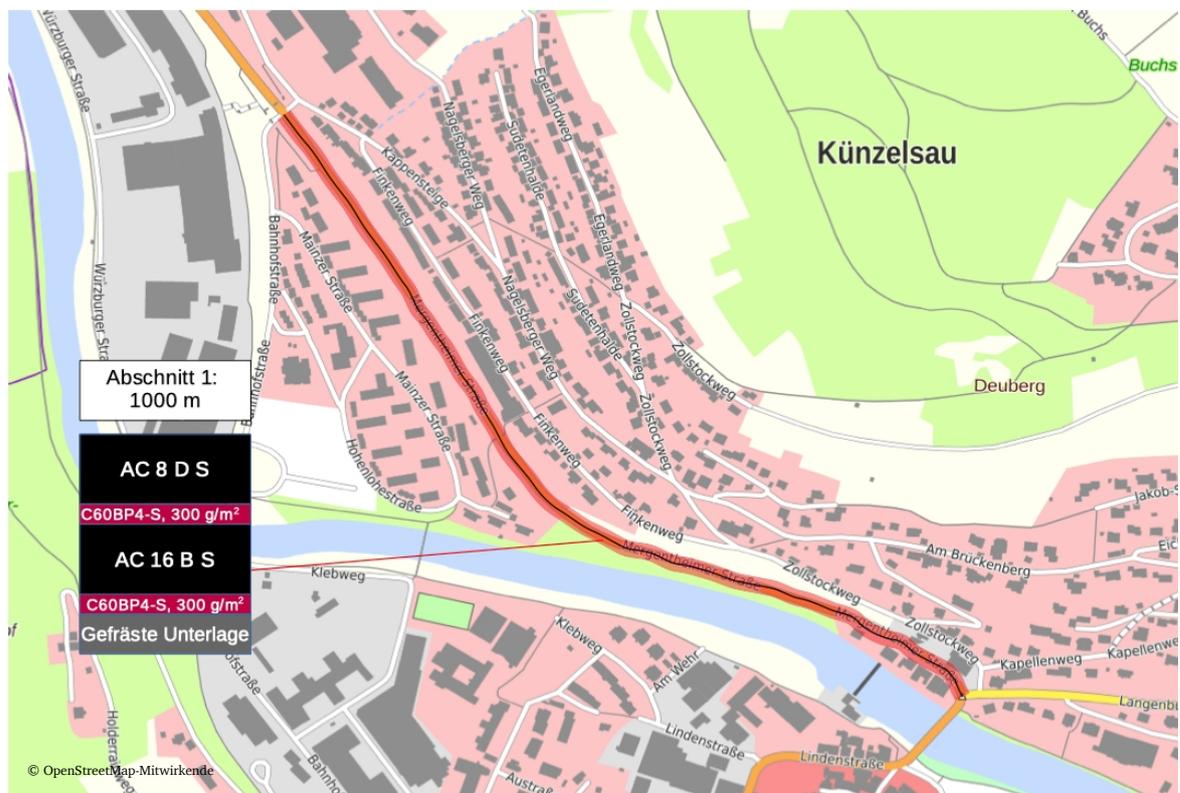


Bild 38: Maßnahme B19 OD Künzelsau

5 Untersuchungen an den Versuchsstrecken

5.1 Baustellenbegleitung

Die Versuchsstrecken wurden von dem Forschungsteam der TU Darmstadt begleitet. Die Begleitung erfolgte von dem Start des Fräsvorganges bis zu dem Einbau des neuen Belages. Während der Begleitung hat das Forschungsteam den Verlauf des Einbaues dokumentiert, sowie die Temperaturen des Asphaltes und der Ansprühmittel während des Einbaues gemessen.

5.2 Bohrkernentnahme und Bohrkernuntersuchung

Aus den Versuchsstrecken wurden Bohrkern für die Prüfung des Abscherversuch nach Leutner (siehe Kapitel 2.6.1) entnommen. Die Entnahmestellen für die Bohrkern wurden hierfür vom Betreuerkreis festgelegt und definieren sich wie folgt: im Querprofil im Abstand von ca. 80 cm und ca. 1,60 m links und rechts von der Mitte der Fertigerbohle. Ziel ist, das nicht repräsentative Stellen am Rand und in der Mitte ausgespart werden.

5.3 Messungen mit dem Falling Weight Deflector (FWD)

Zusätzlich zu der Bestimmung des Schichtenverbunds mit dem Abscherversuch nach Leutner wurden Tragfähigkeitsmessung mit dem Falling Weight Deflector (FWD) durchgeführt. Das FWD ist ein dynamisches Tragfähigkeitsmessverfahren, bei dem durch eine Fallmasse ein Lastimpuls auf die Oberfläche der Fahrbahnkonstruktion aufgebracht wird. Die Fallmasse prallt dabei aus einer definierten Höhe auf ein Feder-Dämpfer-System und erzeugt dabei einen Lastimpuls von 50 kN. Dieser entspricht einer Radlast einer 10-t-Achse. Die Zeitdauer der Belastung soll 25 ms bis 30 ms betragen (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2008). In Bild 39 ist das FWD-Messgerät der TU Darmstadt dargestellt.



Bild 39: FWD-Messgerät

Durch den Lastimpuls entstehen kurzzeitige, vertikale Verformungsgeschwindigkeiten der Oberfläche, welche mit Geophonen gemessen werden. Durch Integrationen wird aus den Geschwindigkeit-Zeit-Verläufen der Verlauf der Verformung in Abhängigkeit der Zeit ermittelt. Die Geophone an dem FWD der TU Darmstadt sind ausgehend vom Lastmittelpunkt wie folgt angeordnet: 210 mm – 300 mm – 450 mm – 600 mm – 900 mm – 1.200 mm – 1.500 mm – 1.800 mm.

5.3.1 Auswertung der FWD-Daten

Die Ermittlung der Tragfähigkeitskennwerte erfolgt nach dem mechanischen Befestigungsmodell – Platte auf elastisch-isotropem Halbraum. In Bild 40 ist das Modell dargestellt.

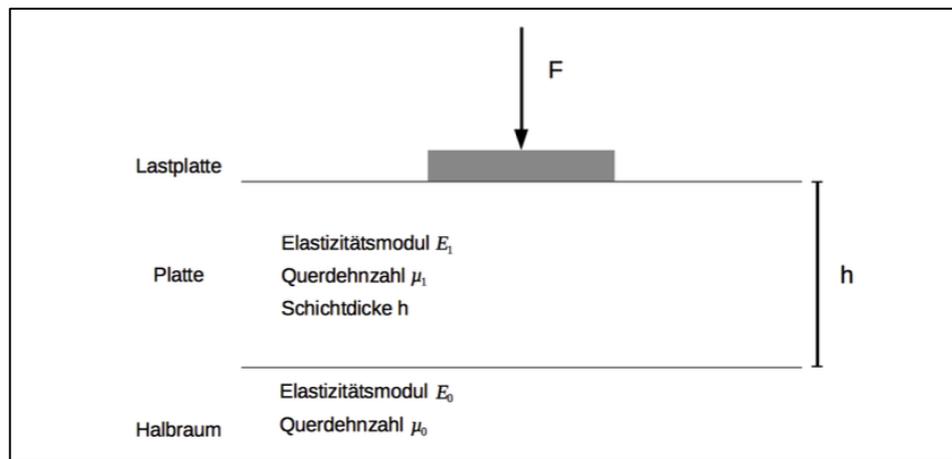


Bild 40: Befestigungsmodell - Platte auf elastisch-isotropem Halbraum (Grätz, 2009)

In dem Modell beschreibt der Halbraum den Unterbau und die Platte umfasst den befestigten Oberbau.

Nach GRÄTZ [2009] erfolgt die Berechnung der Tragfähigkeit und des Schichtenmoduls aus den Messwerten nach dem Regressionsansatz. Hierbei sind folgende Tragfähigkeitskennwerte für die Auswertung relevant:

$$l = h * \sqrt[3]{\frac{M_1}{6 * M_0}} \quad \text{Gleichung 1: Elastische Länge (Grätz, 2009)}$$

h = Dicke der Platte [mm]

M_0 = Schichtmodul des Halbraumes [MPa]

M_1 = Schichtmodul der Platte [MPa]

Die elastische Länge entspricht dem Abstand zwischen dem Verformungsmaximum und dem Wendepunkt der Verformungsmulde (siehe Bild 41). Anfänglich wurde der Parameter für die Beschreibung der Tragfähigkeit der gebundenen Schicht verwendet. Weitere Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass der Parameter eher das Verhältnis der Steifigkeit der gebundenen und ungebundenen Schicht beschreibt (Čičković & Bald, 2017).

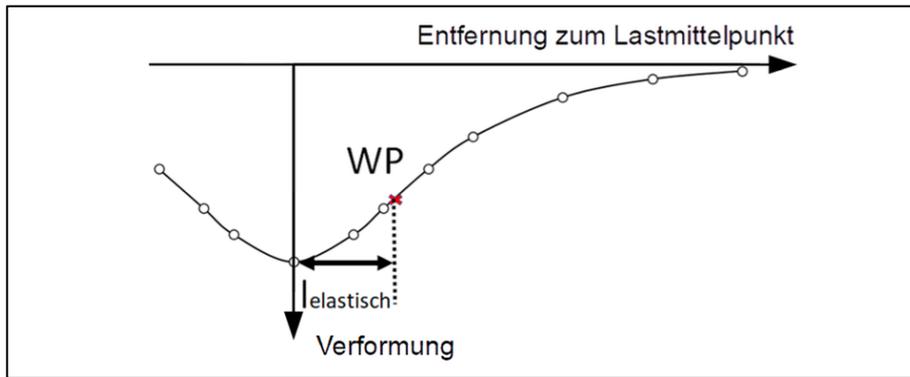


Bild 41: Schematische Darstellung elastische Länge (Čičković et al., 2020)

$$M_0 = \frac{E_0}{1-\mu_0^2} \quad \text{Gleichung 2: Schichtmodul des Halbraumes (Grätz, 2009)}$$

M_0 = Schichtmodul des Halbraumes [MPa]

E_0 = Elastizitätsmodul des Halbraumes [MPa]

μ_0 = Querdehnzahl des Halbraumes [-]

Der Schichtenmodul des Halbraumes M_0 ist eine Tragfähigkeitskennzahl, die die Tragfähigkeit der ungebundenen Schicht beschreibt. Der Schichtmodul ist ein bereinigter Elastizitätsmodul und steht im Zusammenhang mit dem baupraktisch relevanten E_{v2} -Wert (Grätz, 2009). In Tabelle 20 sind Orientierungswerte für M_0 gemäß (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2014) aufgelistet.

Belastungsklasse	Orientierungswert M_0 [MPa]
Bk 100; Bk 32; Bk 10; Bk 3,2; Bk 1,8; Bk 1,0	150
Bk 0,3	125

Tabelle 20: Orientierungswerte M_0 (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2014)

$$M_1 h^3 = 6 * M_0 * l \quad \text{Gleichung 3: Charakteristische Steifigkeit der Platte (Grätz, 2009)}$$

M_0 = Schichtmodul des Halbraumes [MPa]

l = elastische Länge [mm]

Die charakteristische Steifigkeit der lastverteilenden Schicht $M_1 h^3$ kann mechanisch als erhöhte Plattensteifigkeit gesehen werden. Der Parameter beinhaltet eine Aussage über den Schichtenmodul der lastverteilenden Schicht und über die rechnerische Dicke (Čičković & Bald, 2017). In Deutschland liegen gute Erfahrungswerte für den Parameter vor (Čičković et al., 2020). In Tabelle 21 sind die Orientierungswerte aufgelistet.

Belastungsklasse	Orientierungswert M_{1h^3} [MPa]
Bk 100	214,5
Bk 32	158,1
Bk 10	112,5
Bk 3,2	87,6
Bk 1,8	71,6
Bk 1,0	42,0
Bk 0,3	1,7

Tabelle 21: Orientierungswerte M_{1h^3} (Čičković et al., 2020)

5.3.2 Durchführung der FWD-Messung

Für die Messung der Versuchsstrecken wurde ein Messschema erarbeitet, damit die Ergebnisse miteinander verglichen werden können und die Betrachtung des Schichtenverbundes möglich ist. Aus diesem Grund wurden die Versuchsstrecken zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten messtechnisch erfasst. Nach dem Fräsvorgang wurde eine Erstmessung auf der Fräsfläche durchgeführt, hierdurch wurden Kennwerte über den Untergrund ermittelt. Nach dem Einbau der Asphaltdeckschicht wurde die Versuchsstrecke in einer Folgemessung erneut mit dem FWD messtechnisch erfasst.

Tabelle 22 listet die Zeitpunkte der Erst- und Folgemessung auf.

Versuchsstrecke	Erstmessung	Folgemessung	Länge [km]
B 48; Alsenz	07.10.2020	02.11.2020	1,00
B 420, Fürfeld	23.10.2020	31.10.2020	1,40
B 10, Münchweiler	15.06.2021	26.08.2021	2,70
B 19 Künzelsau	26.08.2021	05.10.2021	1,00

Tabelle 22: Zeitpunkt FWD-Messung

Die Messungen erfolgten anhand eines vorab festgelegtem Messrasters. Die Messpunkte wurden dabei mit einem GPS-Gerät aufgenommen, wodurch eine Zuordnung der Messergebnisse und Messpunkte möglich ist.

6 Ergebnisse der Baumaßnahmen

Die Ergebnisse der Baumaßnahmen gliedern sich in Ergebnisse, die vor und während des Einbaues dokumentiert wurden, sowie in Ergebnisse, die anschließend an Probeeimern und Bohrkernen erzielt wurden.

6.1 Ergebnisse Einbautemperaturen

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Ergebnisse der Messungen der Temperaturen der Unterlage und des Mischguts. Die Messung dieser Temperaturen erfolgte während des Einbaues mittels eines Infrarot Thermometer an zwei definierten Stellen. In Bild 42 sind die Messpunkte dargestellt. Der Messpunkt der Temperatur Unterlage definiert die bereits angesprühte Unterlage, hierbei ist die angesprühte Emulsion bereits vollständig gebrochen.



Bild 42: Messpunkte der Temperaturmessungen

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Ergebnisse der Temperaturmessungen der Maßnahmen. Die Einzelwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

6.1.1 Ergebnisse Temperatur der Unterlage

Die Temperaturen der Unterlagen sind in Bild 43, Bild 44, Bild 45 und Bild 46 dargestellt. Die Temperatur wurde nach der Applikation der Ansprühmittel gemessen, vor dem Einbau der neuen Asphalttschicht. Die Maßnahmen in Alsenz und Fürfeld wurden im Herbst ausgeführt, aus diesem Grund lagen die Temperaturen der Unterlage im Bereich zwischen 8 °C und 18 °C.

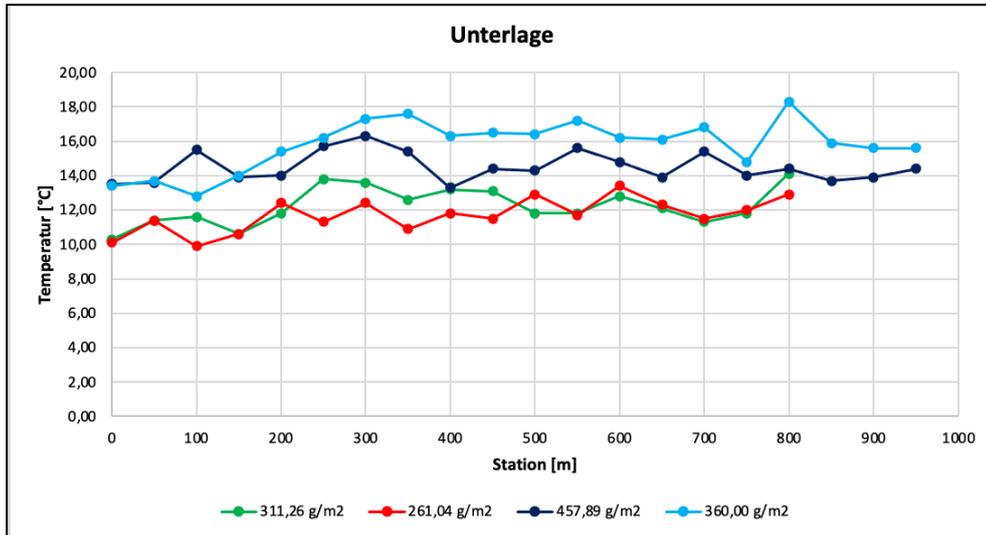


Bild 43: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen von C 40 B5-S - Einbau Binderschicht - Fürfeld

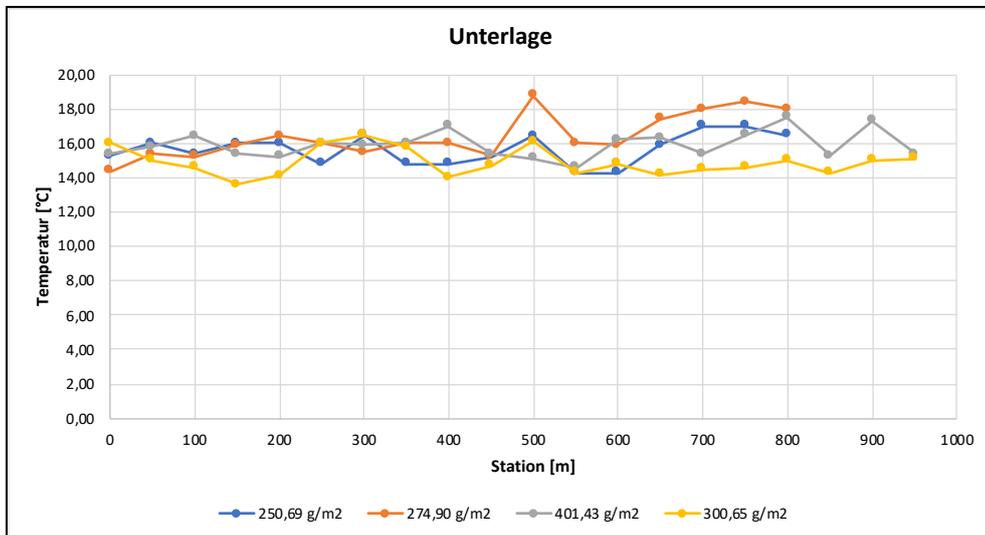


Bild 44: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen von C 40 B5-S - Einbau Deckschicht - Fürfeld

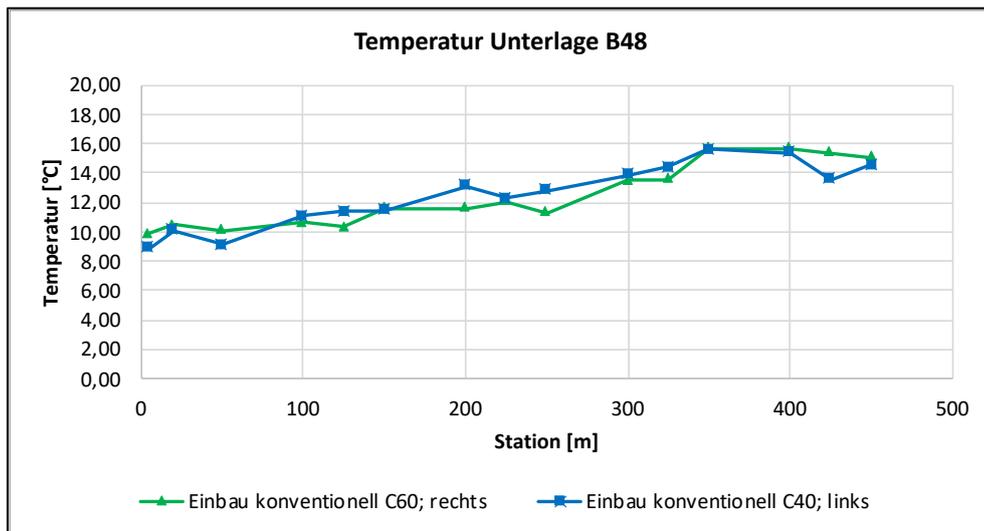


Bild 45: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen – Alsenz

In Bild 46 und Bild 47 sind die Temperaturverläufe der Unterlagen zu sehen. Dabei werden die Temperaturen der zwei Einbautage, die für diese Streckenlänge benötigt wurden, deutlich. Beim Einbau der Binderschicht (Bild 46) am ersten sehr sonnigen und warmen Einbautag im Juni ist zu sehen, dass die Temperatur vom Einbaustart morgens (Station 0+000) bis zur Mittagszeit (ca. Station 0+1000) fast konstant anstieg. Die angesprühte schwarze Oberfläche reagierte auf die Sonneneinstrahlung mit starker Erwärmung. Bei den Abschnitten mit Kalkmilch ist zu sehen, dass diese trotz gleichbleibender Sonneneinstrahlung 5-10°C kühler sind. Am zweiten Einbautag, an welchem die Temperatur ab Station 1+850 aufgenommen wurde, war das Wetter bewölkt und die Sonneneinstrahlung mäßig. Daher bleibt die Oberflächentemperatur auf einem gleichbleibend niedrigen Niveau von 25°C.

Beim Einbau der Deckschicht (Bild 47) lässt sich ein ähnlicher Trend erkennen: An beiden Einbautagen war es zunächst sonnig. Die Abschnitte mit Kalkmilch, die am ersten Tag überbaut wurden, konnten das Temperaturniveau etwas herabsetzen (ca. 5°C). Am zweiten Einbautag ist der Einfluss von Niederschlag zu sehen: Ab Station 2+400 setzte leichter Regen ein, welcher den Bauprozess jedoch nicht behinderte. Dennoch spielten die Bewölkung und der Niederschlag für die Oberflächentemperatur eine große Rolle, sodass die Temperatur zum Nachmittag hin fast wieder auf die Ausgangstemperatur am Morgen gesunken war.

Die Witterung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Unterlage.

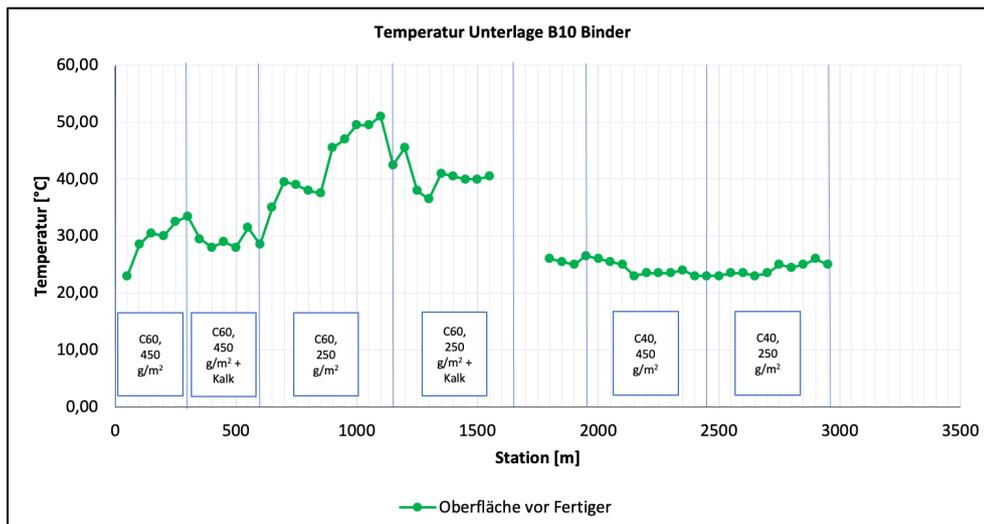


Bild 46: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen - Einbau Binderschicht - Münchweiler

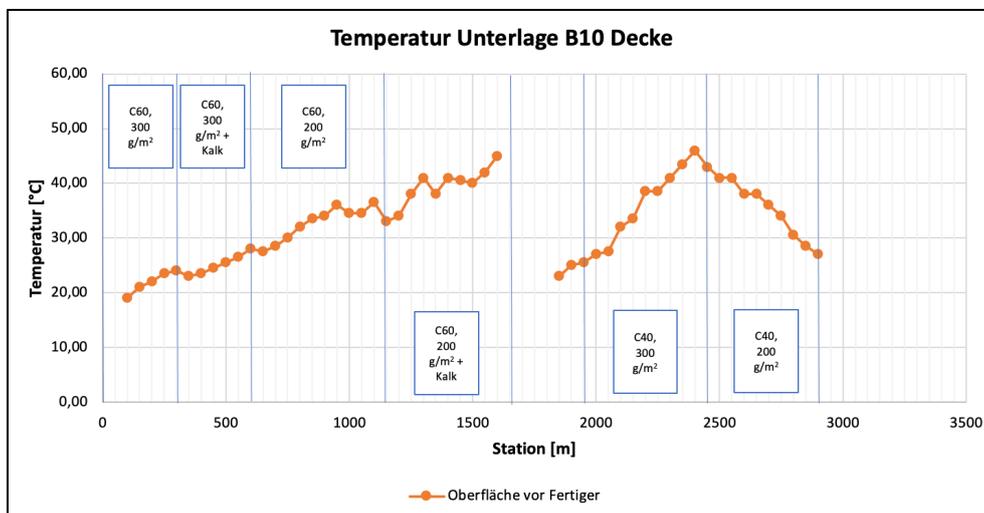


Bild 47: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen - Einbau Deckschicht - Münchweiler

6.1.2 Ergebnisse Temperatur Mischgut

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen des Mischgutes sind in Bild 48, Bild 49 und Bild 50 dargestellt. Die Temperaturen für das Mischgut liegen stets zwischen 140 °C und 180 °C.

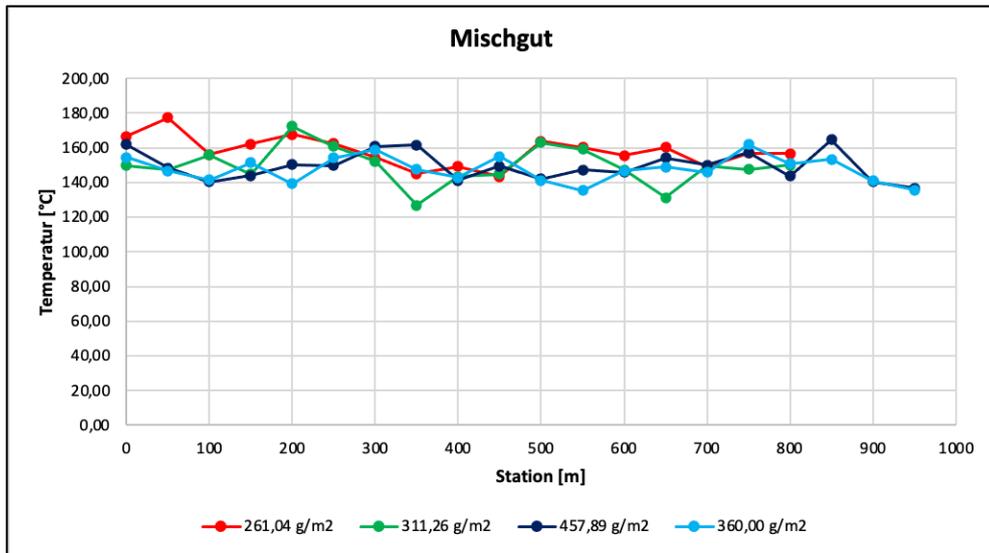


Bild 48: Temperatur Mischgut Einbau Binderschicht - Fürfeld

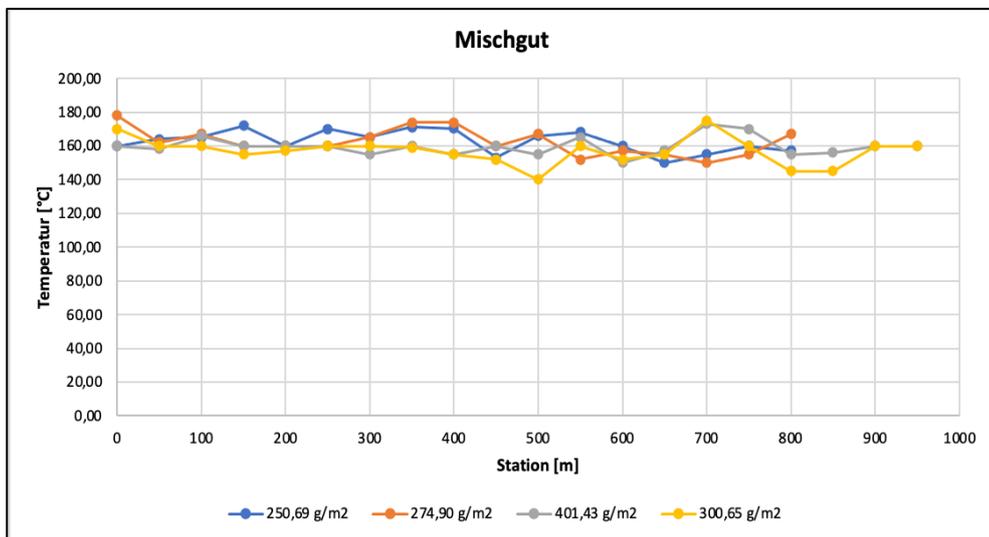


Bild 49: Temperatur Mischgut Einbau Deckschicht - Fürfeld

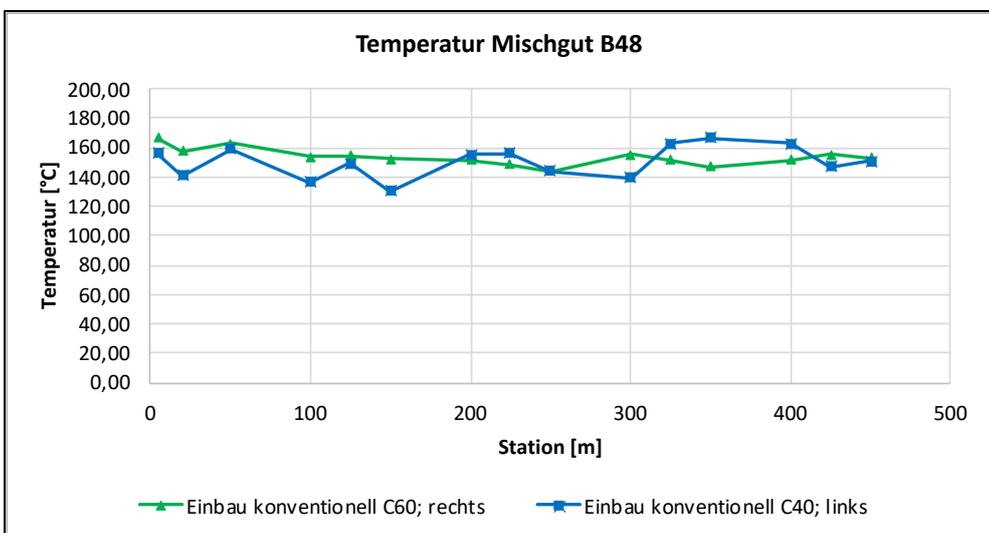


Bild 50: Temperatur Mischgut – Alsenz

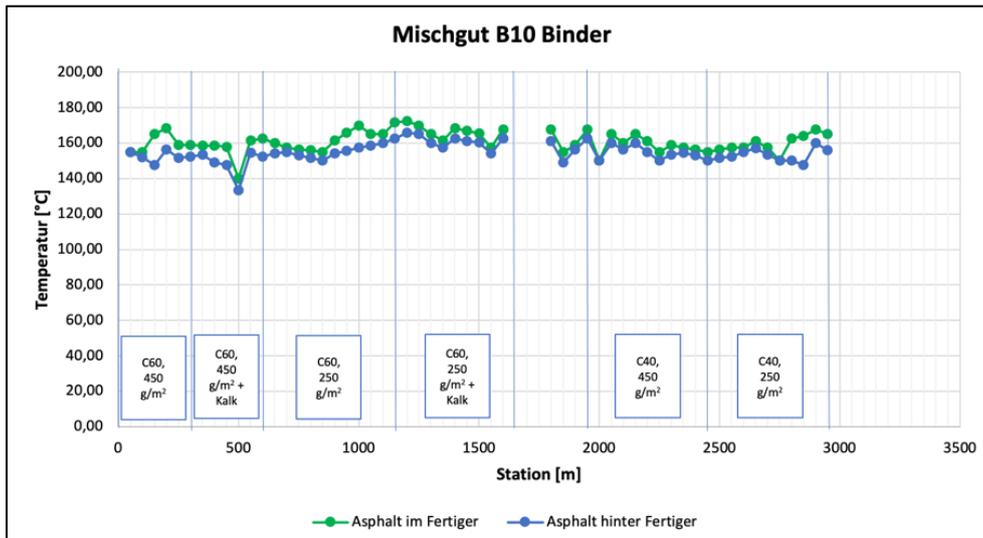


Bild 51: Temperatur Mischgut - Einbau Binderschicht - Münchweiler

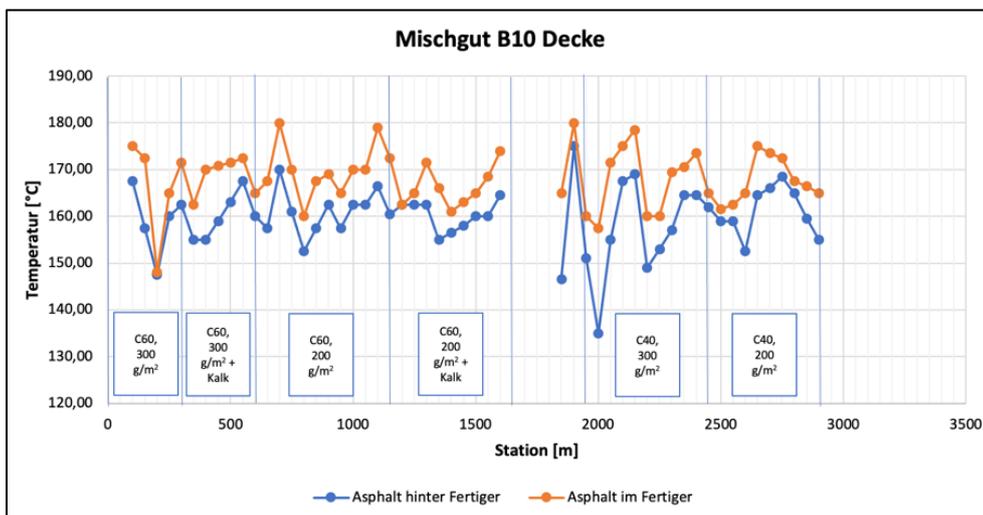


Bild 52: Temperatur Mischgut - Einbau Deckschicht - Münchweiler

6.2 Ergebnisse Abscherversuch nach Leutner

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Mittelwerte der Ergebnisse des Abscherversuch nach Leutner. Die Bohrkern für die Prüfung wurden unmittelbar nach der Fertigstellung der Maßnahme entnommen. Die Prüfung des Schichtenverbundes erfolgte an jeweils zwei Bohrkernen je Entnahmestelle.

Die Darstellung der Ergebnisse richtet sich zum einen nach der Ansprühmenge und zum anderen nach dem verwendeten Ansprühmittel.

Alsenz – B48

Bild 53 stellt die Ergebnisse des Abscherversuch nach Leutner der Maßnahme in Alsenz dar. Die Ergebnisse zeigen den Vergleich der beiden Ansprühmengen C60 BP4-S und C40 B5-S auf einer gefrästen Unterlage bei einer Ansprühmenge von 250 g/m².

Insgesamt liegen die Ergebnisse aus den beiden Abschnitten im Bereich der geforderten 15 kN gemäß ZTV Asphalt-StB (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2013) und können als unkritisch angesehen werden. Das Ansprühmittel C40 B5-S erzielt allerdings im Vergleich zu dem Ansprühmittel C60 BP4-S höhere Scherkräfte und weist somit eine höheren Schichtenverbund auf.

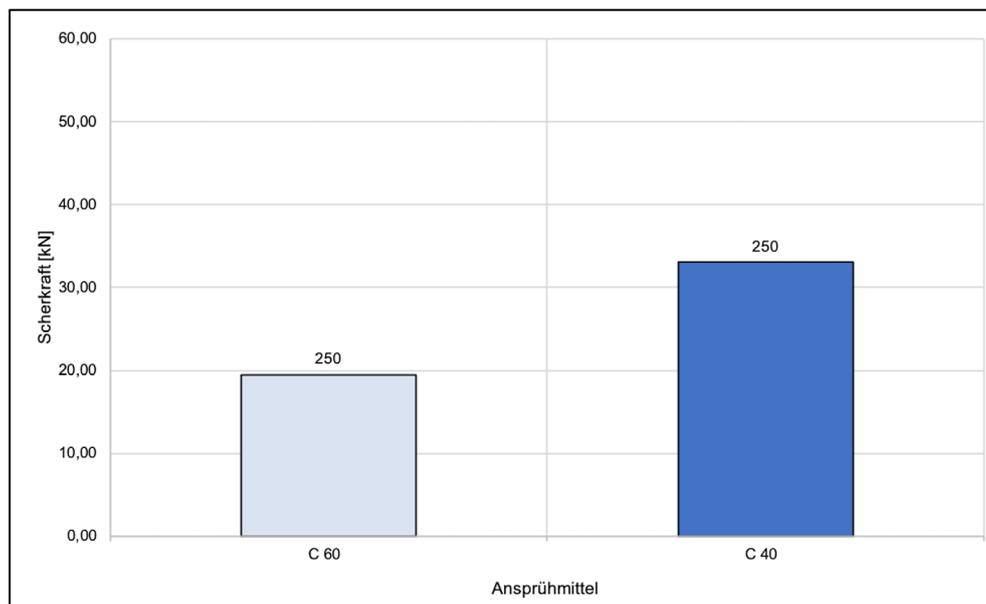


Bild 53: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Tragschicht gefräster Unterlage - Alsenz

Fürfeld – B420

Die Ergebnisse der Maßnahme in Fürfeld sind in Bild 54 und Bild 55 dargestellt. In der Maßnahme wurde die Bitumenemulsion C40 B5-S mit verschiedenen Ansprühmengen eingesetzt. In Bild 54 ist der Vergleich auf einer gefrästen Unterlage dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass die geringe Ansprühmenge die niedrigsten Scherkräfte aufweist. Der Wert liegt etwas oberhalb der geforderten 12 kN gemäß ZTV Asphalt-StB (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2013).

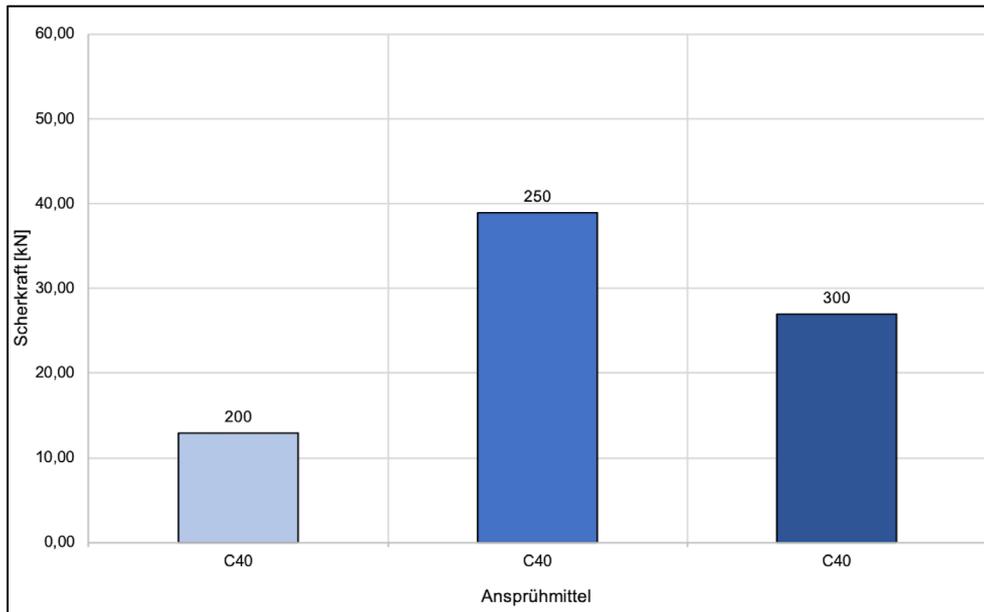


Bild 54: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht geprüfter Unterlage – Fürfeld

In Bild 55 sind die Ergebnisse zwischen der Deckschicht und der Binderschicht dargestellt. Die Binderschicht wurde vorher neu hergestellt. Insgesamt weisen die Ergebnisse für die vier verschiedenen Ansprühmengen sehr hohe Scherkräfte auf. Die Scherkräfte nehmen von der geringsten Ansprühmenge (200 g/m²) zur höchsten Ansprühmenge (400 g/m²) leicht ab.

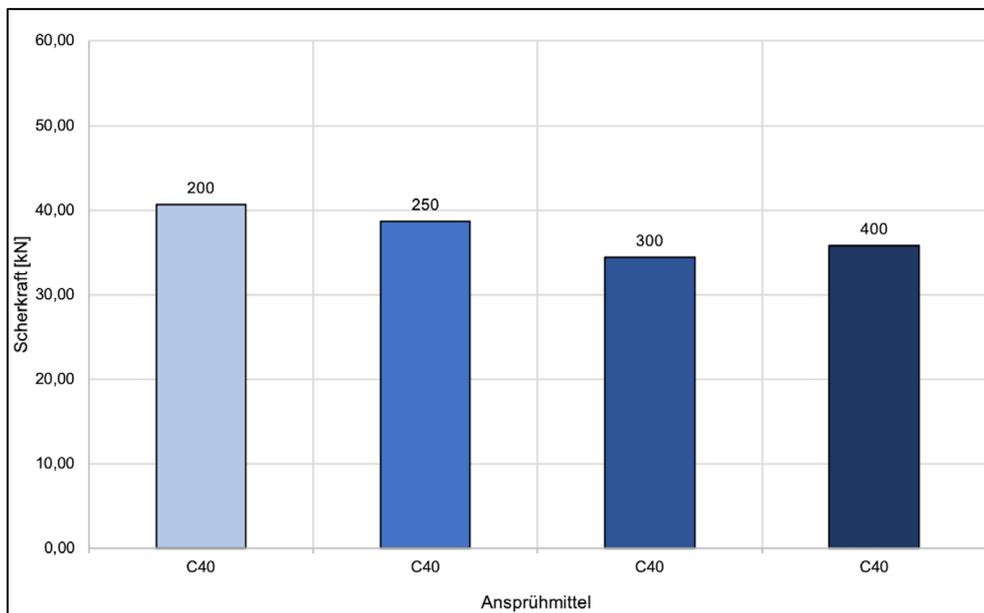


Bild 55: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Fürfeld

Künzelsau – B19

In der Maßnahme in Künzelsau wurde die Bitumenemulsion C60 BP4-S mit einer Ansprühmenge von 300 g/m² auf zwei verschiedenen Unterlagen eingesetzt. Zum einen wurde die Bitumenemulsion auf eine gefräste Tragschicht appliziert und anschließend mit einer Binderschicht überbaut und zum anderen wurde die Bitumenemulsion auf eine neu hergestellten Binderschicht appliziert und mit einer Asphaltdeckschicht überbaut. Die Ergebnisse sind in Bild 56 und Bild 57 dargestellt.

Die Scherkräfte zwischen der gefrästen Unterlage und der Binderschicht liegen hierbei im untersten Bereich. Die Scherkräfte zwischen der Asphaltdeckschicht und der Binderschicht hingegen in einem sehr hohen Bereich.

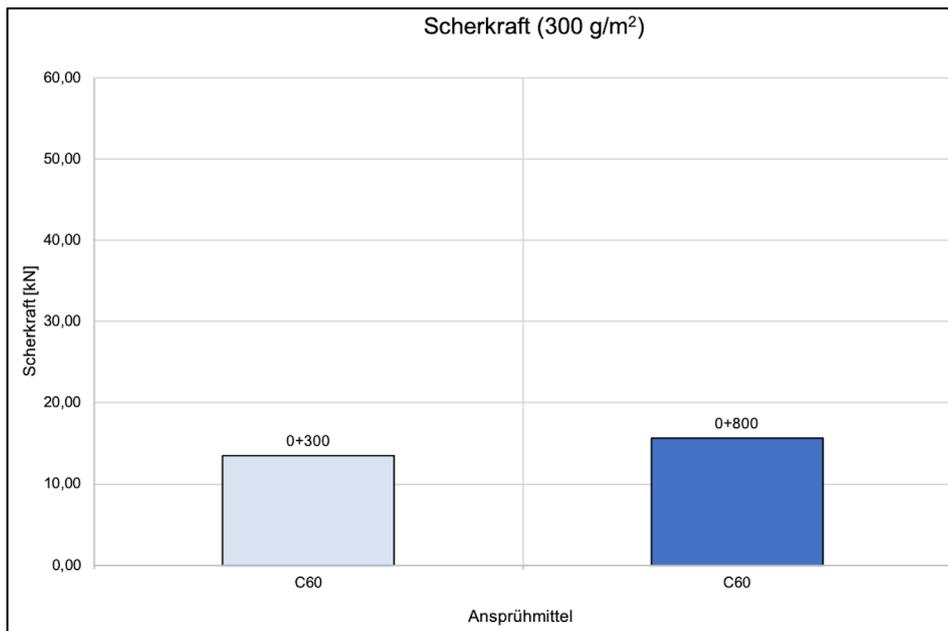


Bild 56: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht neu hergestellte Unterlage – Künzelsau

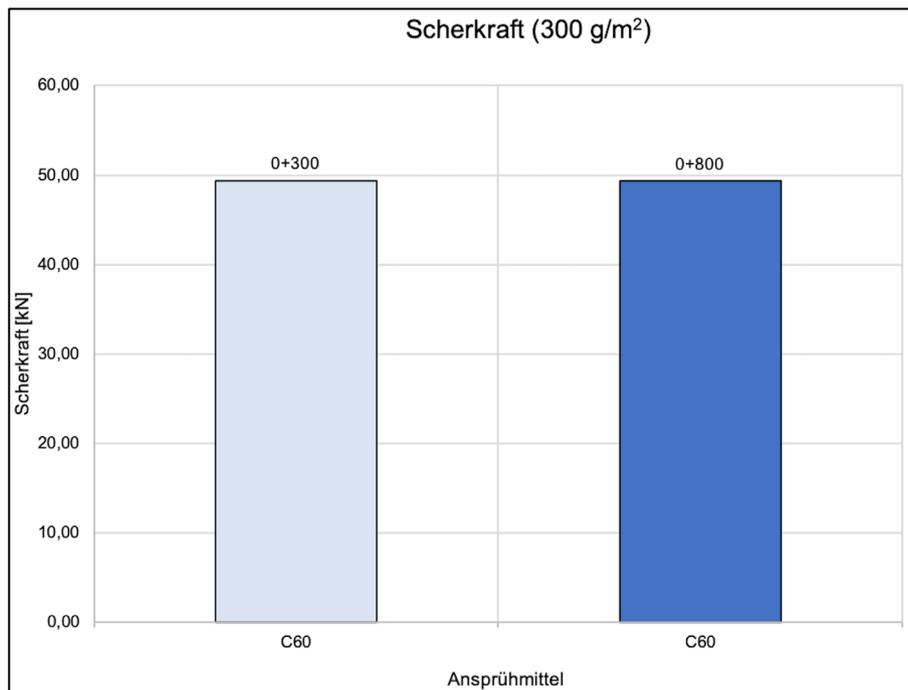


Bild 57: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Künzelsau

Münchweiler – B10

In der Maßnahme Münchweiler wurden die beiden Bitumenemulsionen C40 B5-S und C60 BP4-S mit verschiedenen Mengen eingesetzt.

In Bild 58 und Bild 59 sind die Ergebnisse des Abscherversuch nach Leutner aus der Maßnahme dargestellt.

Bild 58 zeigt den Vergleich zwischen der Binder- und Tragschicht. Hierbei erzielt die hohe Ansprühmenge der C40 B5-S den besten Verbund. Die niedrigsten Scherwerte weist die Variante C40 B5-S mit einer Ansprühmenge von 250 g/m².

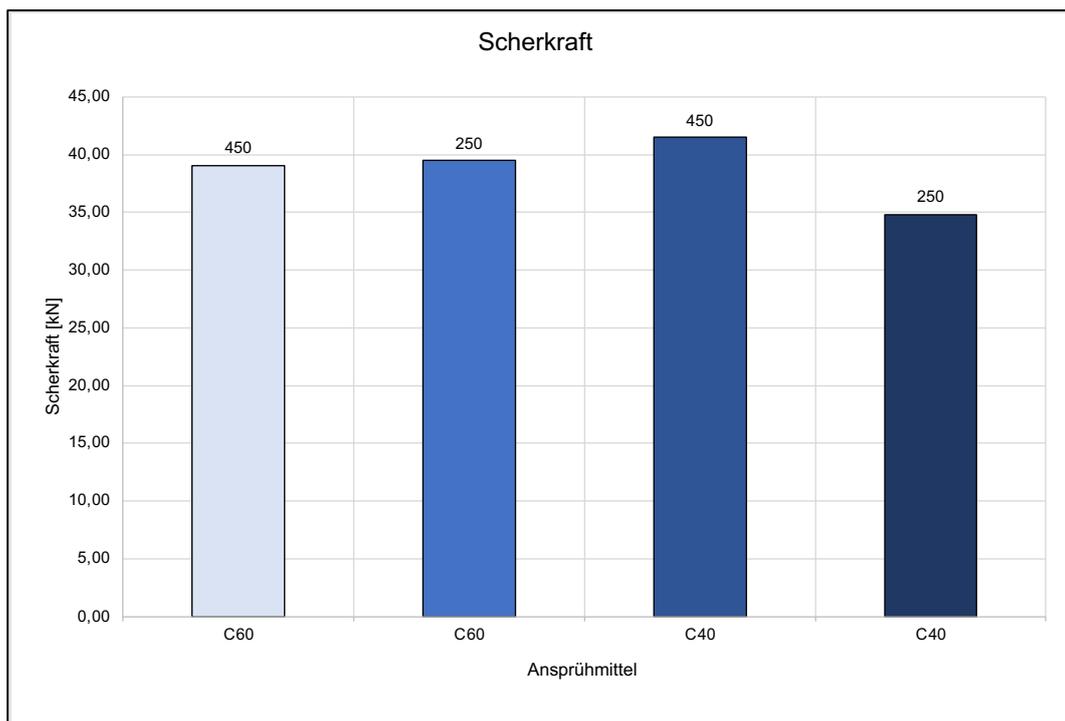


Bild 58: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage - Münchweiler

In Bild 59 sind die ermittelten Scherkräfte zwischen der Asphaltdeckschicht und Binderschicht dargestellt. Die Ergebnisse liegen alle innerhalb eines Niveaus und unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Es liegen alle Scherkräfte im Bereich von 30 kN und erfüllen somit die geforderten 15 kN der Richtlinie.

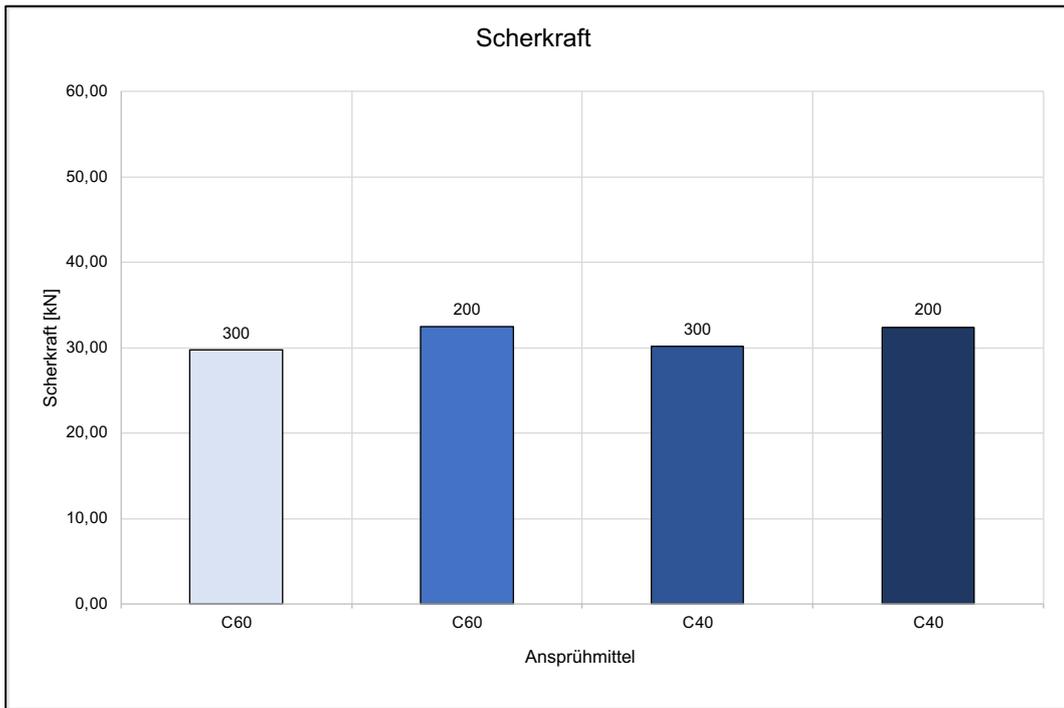


Bild 59: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Münchweiler

Bad Urach – L211

In der Maßnahme Bad Urach wurden ebenfalls die beiden Bitumenemulsionen C40 B5-S und C60 BP4-S eingesetzt. Die Bitumenemulsionen wurden für die Untersuchungen auf eine gefräste Unterlage und auf eine neu hergestellte Unterlage appliziert.

In Bild 60 sind die Ergebnisse der gefrästen Unterlage dargestellt. Beide Bitumenemulsionen wurden mit einer Menge von 350 g/m² aufgesprüht. Die Bitumenemulsion C60 BP4-S erzielt hierbei leicht höhere Scherkräfte.

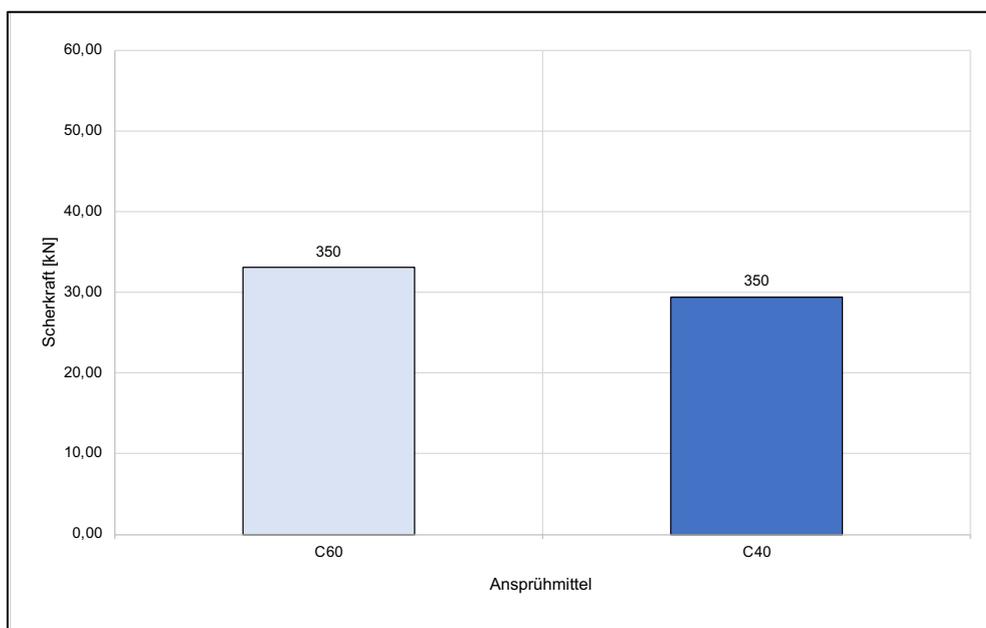


Bild 60: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage – Bad Urach

Bild 61 stellt die Ergebnisse zwischen Asphaltdeckschicht und Binderschicht für die Ansprühmengen von 300 und 400 g/m² der jeweiligen Ansprühmittel dar. Es sind nur geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen zu erkennen.

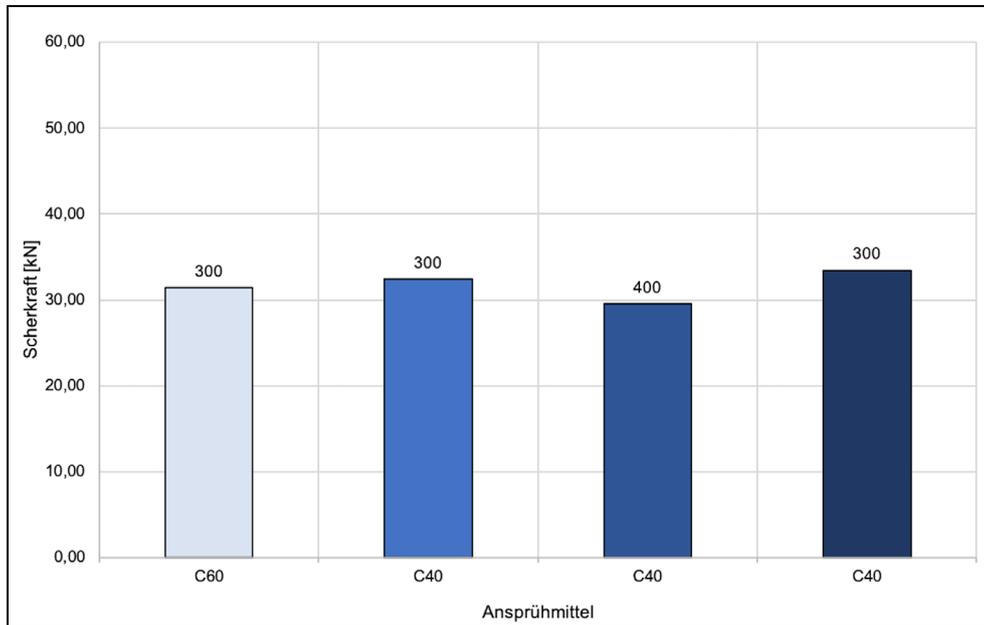


Bild 61: Ergebnisse zwischen Asphaltdeckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Bad Urach

6.3 Ergebnisse Tragfähigkeit (FWD-Messung)

Die FWD Ergebnisse wurden wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben nach dem Verfahren „Platte auf elastisch- isotropen Halbraum“ mit dem Ansatz nach GRÄTZ [2009] ausgewertet. Anschließend wurden danach die Tragfähigkeitskennwerte M_0 (Schichtmodul des Halbraumes) und M_1h^3 (Charakteristische Steifigkeit der Platte) des Untergrundes und der fertiggestellten Asphaltkonstruktion in einem Streckenband für jede Baumaßnahme anschaulich dargestellt. Für die grafischen Darstellung der Messergebnisse erfolgt die Visualisierung der Tragfähigkeitskennwerte mit QGIS. Die zahlenmäßigen Werte der Messergebnisse sind im Anhang ersichtlich.

Für eine Bewertung des Schichtenverbundes wurden zusätzlich für dieses Forschungsprojekt anhand der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht M_1h^3 die Messergebnisse der Erstmessung (Unterlage) und der Folgemessung (nach Einbau) miteinander verglichen. Der Vergleich erfolgt zum einen als grafische Gegenüberstellung der Tragfähigkeitskennwerte im Streckenband als auch als grafische Darstellung der prozentualen Veränderung der Messergebnisse. Die prozentuale Veränderung wird dabei wie folgt berechnet:

$$M_1h_{i,rel}^3 = \frac{M_1h_{i,FM}^3 - M_1h_{i,EM}^3}{M_1h_{i,EM}^3} \quad \text{Gleichung 4}$$

$M_1h_{i,rel}^3$ = Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht an der Stelle i [-]

$M_1h_{i,EM}^3$ = Charakteristische Steifigkeit der lastverteilenden Schicht der Erstmessung an der Stelle i [-]

$M_1h_{i,FM}^3$ = Charakteristische Steifigkeit der lastverteilenden Schicht der Folgemessung an der Stelle i [-]

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Bild 62 und Bild 63 dargestellt. In Bild 62 sind die Ergebnisse aus der Maßnahme in Alsenz (B 48) abgebildet. Im rechten Bild ist der Tragfähigkeitskennwert M_1h^3 der Erstmessung und der Folgemessung im Streckenband grafisch dargestellt. Der Tragfähigkeitskennwert der Unterlage (Erstmessung, Streckenband innen) weist niedrigere Werte auf, als im Vergleich der Tragfähigkeitskennwert der Folgemessung (Streckenband außen). Bei der Folgemessung liegt M_1h^3 überwiegend im Bereich von > 80 MNm.

Im rechten Bild ist die berechnete prozentuale Veränderung zwischen der Erst- und der Folgemessung wiedergegeben. Im Vergleich der beiden Ansprühmittel fällt auf, dass die Veränderung bei dem Einsatz des Sprühfertigers mit dem Ansprühmittel C 60 größer ist. Hier sind mehr blaue Bereich und weniger rote Bereich vorhanden. Bei dem Einsatz der Emulsion im konventionellen Einbau ist die Veränderung bei der C 40 Emulsion deutlich besser. In diesem Bereich sind keine roten oder orangen Bereiche, welche für eine geringe Veränderung stehen, ersichtlich. Die Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse des Abscherversuch nach Leutner wider.

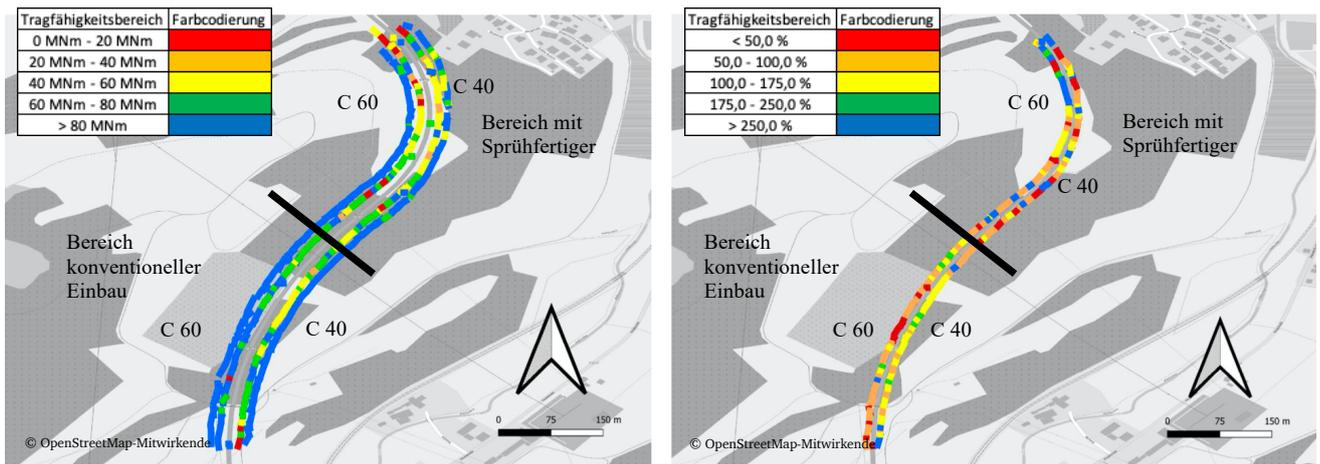


Bild 62: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht – Alsenz

In Bild 63 sind die Ergebnisse aus der Maßnahme in Fürfeld (B 420) abgebildet. Innerhalb dieser Maßnahme wurden verschiedene Ansprühmengen des Ansprühmittels C 40BF5-S eingesetzt. Anhand des prozentuellen Unterschiedes zwischen der Erst- und der Folgemessung kann eine Aussage über den Schichtenverbund gemacht werden. In den Abschnitten 1 und 2 ist die niedrigste Veränderung zwischen der Erst- und der Folgemessung anhand der vielen roten Werte ersichtlich. In den Abschnitten 3 und 4 liegt die Veränderung eher im grünen Bereich. Dies spiegeln ungefähr die Ergebnisse aus dem Abscherversuch nach Leutner wider.

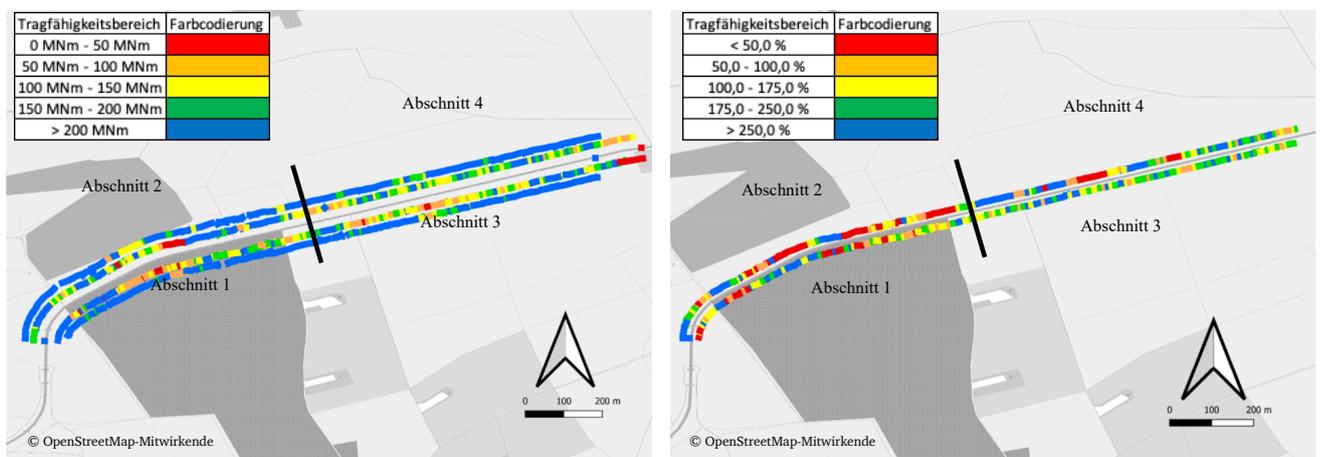


Bild 63: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht - Fürfeld

In Bild 64 sind die Ergebnisse aus der Maßnahme in Künzelsau (B 19) abgebildet. In dieser Maßnahme wurden das Ansprühmittel C 60BP4-S eingesetzt. Anhand des prozentuellen Unterschiedes zwischen der Erst- und der Folgemessung kann eine Aussage über den Schichtenverbund gemacht werden. Der Unterschied liegt hierbei durchgehend im blauen (>250,0 %) Bereich, welcher für einen sehr guten Schichtenverbund steht. Die Ergebnisse gilt es im weiteren Verlauf mit den Ergebnissen des Abscherversuch nach Leutner zu vergleichen.

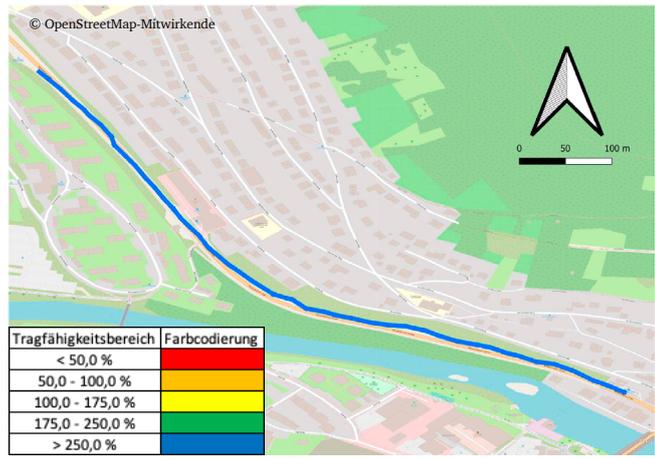


Bild 64: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht – Künzelsau

In Bild 65 sind die Ergebnisse aus der Maßnahme in Münchweiler (B 10) abgebildet. In dieser Maßnahme wurden das Anstrühmittel C 60BP4-S eingesetzt. Anhand des prozentuellen Unterschiedes zwischen der Erst- und der Folgemessung kann eine Aussage über die Schichtenverbundsgüte gemacht werden. Der Unterschied liegt hierbei durchgehend im roten (<50,0 %) Bereich, welcher für einen sehr schlechten Verbund steht. Die Ergebnisse gilt es im weiteren Verlauf mit den Ergebnissen des Abscherversuch nach Leutner zu vergleichen.

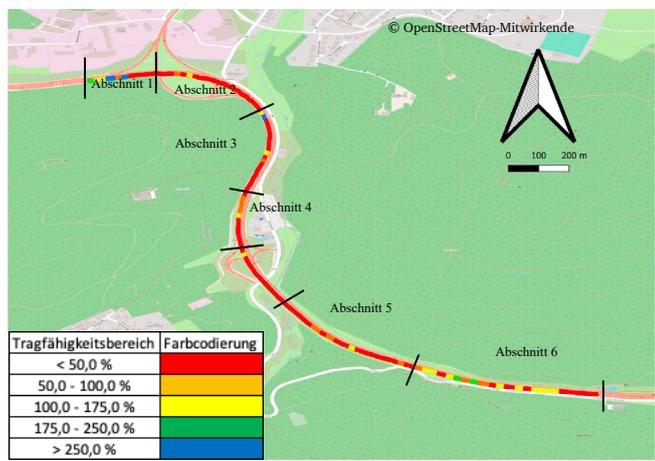


Bild 65: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht - Münchweiler

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist eine systematische Untersuchung des Einflusses der Applikation von Anstrühmittel auf die Güte des Schichtenverbundes der zu verbindenden Asphaltsschichten. Dabei soll neben der Art auch die Dicke des Anstrühmittels variiert werden sowie die Art der Oberflächenvorbereitung. Basierend auf den Untersuchungen im Labor und aus den Baumaßnahmen sollen die gewonnen Ergebnisse in diesem Kapitel ausgewertet werden, damit allgemeingültige Empfehlungen formuliert werden können, die den Einsatz von Anstrühmittel und dessen Einfluss auf den Schichtenverbund charakterisieren.

7.1 Einfluss der Anstrühmittel auf den Schichtenverbund

Der Einfluss der Anstrühmittel auf den Schichtenverbund wurde zum einen mit dem Abscherversuch nach Leutner und zum anderen mit der Tragfähigkeitsmessung mittels FWD bestimmt. Um die beiden Anstrühmittel für die gefrästen Unterlagen zu vergleichen, wurden die Bitumenmengen der in den Baumaßnahmen eingesetzten Anstrühmittel berechnet und die Scherwerte darüber aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Bild 66 dargestellt. In Bild 67 sind die Ergebnisse aus den Laborversuchen dargestellt.

Sowohl bei den Ergebnissen aus den Baumaßnahmen als auch bei denen aus den Laborversuchen ist festzustellen, dass sich die Scherwerte im Vergleich zu den Grenzwerten aus der ZTV Asphalt-StB auf einem hohen Niveau befinden und nur geringe Unterschiede zwischen den Mittelwerten vorhanden sind.

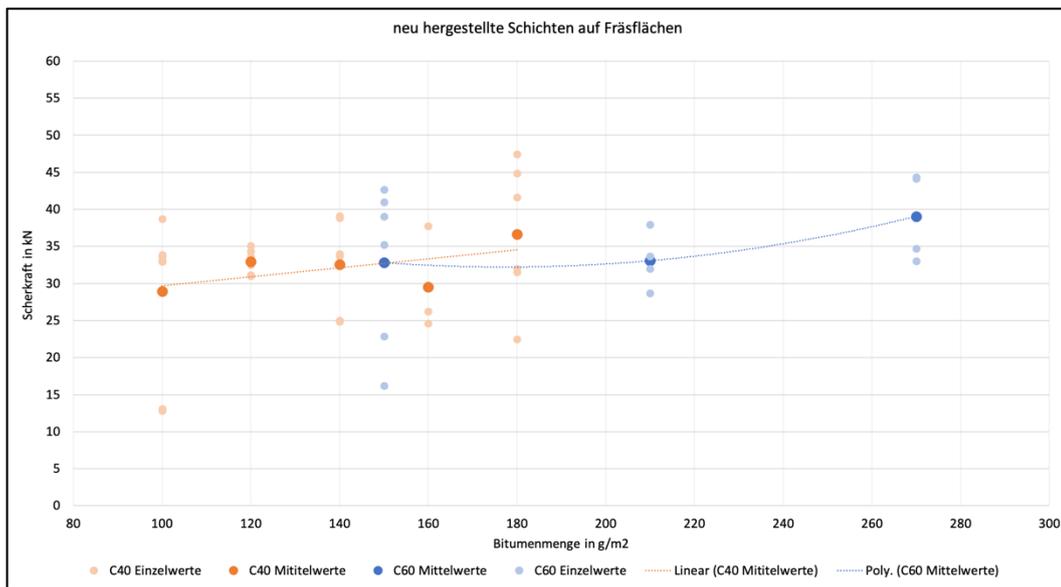


Bild 66: Vergleich Bitumenemulsionen auf gefräster Unterlage – Baumaßnahmen

Insgesamt ist zu erkennen, dass bei der Bitumenemulsion C60BP4-S sowohl beim Laborversuch als auch bei den Werten aus der Baumaßnahme näherungsweise ein parabelförmiger Verlauf ersichtlich wird. Dabei ist die Parabel nach oben geöffnet, was bedeutet, dass mittlere Mengen einen tendenziell geringeren Scherwert aufweisen. Es wird vermutet, dass bei geringen Anstrühmengen die Verzahnung überwiegend den Schichtenverbund bestimmt und bei hohen

Mengen die Verklebung. Diese Vermutung gilt es mit neuen bzw. weiteren Methoden und Prüfverfahren zu beweisen. Bei der Emulsion C40 B5-S ist bei den Ergebnissen aus den Baumaßnahmen eine mit der Bitumenmenge steigende Scherkraft zu erkennen. Dies könnte daran liegen, dass durch die höhere Menge mehr Bindemittel auf die gefräste Fläche aufgetragen wird. Geringe Mengen C40 B5-S sorgen dafür, dass die benötigte Verklebung der Schichten nicht mehr hergestellt werden kann. In den Laborergebnissen ist die bekannte nach oben geöffnete Parabel zu erkennen. Diese Erkenntnis ist möglicherweise durch die wechselnden Rahmenbedingungen bei den Baumaßnahmen zu erklären: Möglicherweise sorgen Schmutzeintrag und Witterung dafür, dass geringe Mengen C40 B5-S nicht so wirksam sind wie mittlere oder höhere Mengen der Emulsion. Dieser Effekt des Schmutzeintrages lässt sich im Labor nur schwierig simulieren. Generell ist zu erkennen, dass die Ergebnisse mit steigender Bitumenmenge eine abnehmende Streuung aufweisen. Daher scheint eine höhere Bitumenmenge bei gefrästen Flächen, neben Einflüssen einzelner Baustellenbedingungen, zu einer besseren Prozesssicherheit zu führen.

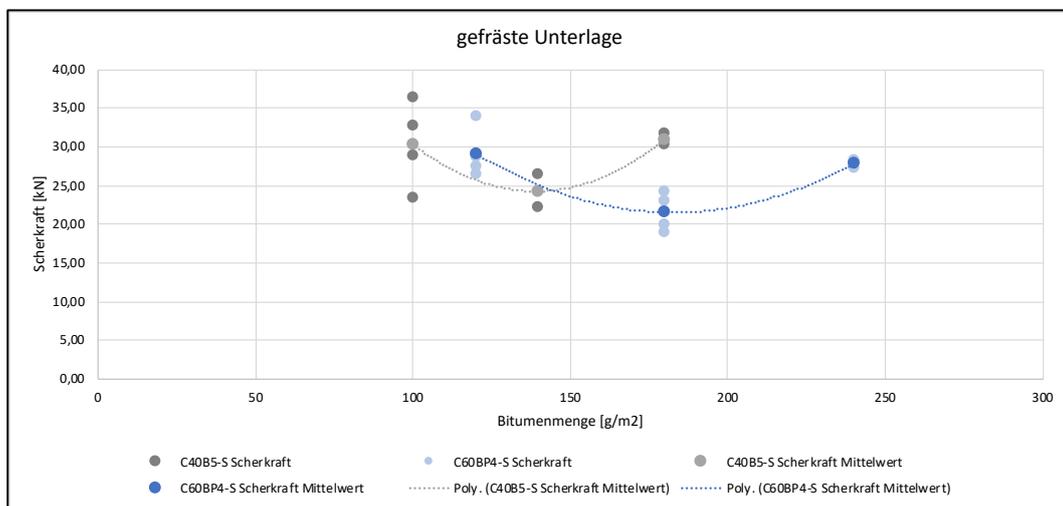


Bild 67: Vergleich Bitumenemulsionen auf gefräster Unterlage - Laborversuche

Für die Bitumenmengen aus der C60 BP4-S ist in beiden Bildern zu erkennen, dass die geringe Menge eine höhere Streuung der Einzelwerte besitzt. Höhere Bitumenmengen führen zu einem prozesssichereren Ergebnis. Für C40 BF5-S ist dieser Trend nicht zu erkennen. Hierbei weisen alle Bitumenmengen, außer bei den beiden geringsten Mengen, eine vergleichsweise hohe Streuung auf.

Die C60 BP4-S besteht aus polymermodifiziertem Bitumen, die C40 BF5-S besteht aus Standardbitumen und Fluxmittel. Außerdem wies die C60 BP4-S in den Testergebnissen der Bitumenversuche die höhere Steifigkeit auf.

Um die beiden Ansprühmittel für neu hergestellte Schichten zu vergleichen, stehen nur die Ergebnisse aus den Baumaßnahmen zur Verfügung. Daher erfolgt der Vergleich anhand dieser Ergebnisse. Die Ergebnisse sind in Bild 68 dargestellt.

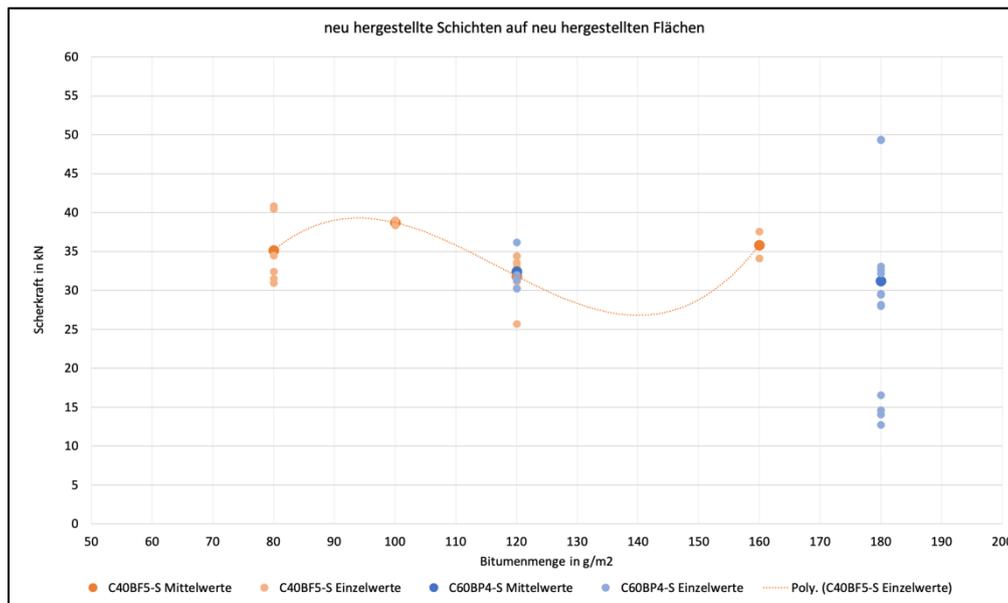


Bild 68: Vergleich Bitumenemulsionen auf neu hergestellter Unterlage – Baumaßnahmen

Auch in diesem Fall ist zu sehen, dass sich die Scherwerte im Vergleich zu den Grenzwerten aus den Richtlinien (ZTV Asphalt-StB) auf einem hohen Niveau befinden und nur geringe Unterschiede zwischen den Mittelwerten vorhanden sind.

Bei der Emulsion C40 B5-S ist wieder ein parabelförmiger Verlauf der Scherwerte zu erkennen, der durch geringere Scherwerte bei zu geringen Bitumenmengen ergänzt wird. Dies bedeutet, dass die tendenziell höchsten Scherwerte durch niedrige und hohe Bitumenmengen erzielt werden, allerdings führt eine zu geringe Bitumenmenge (80 g/m^2) zu einem ähnlich geringen Schichtenverbund, wie die mittleren Mengen. Es ist davon auszugehen, dass der Scherwert unter einer Bitumenmenge von 80 g/m^2 abnimmt.

Zusätzlich ist aus dem Bild zu erkennen, dass die Streuung bei der hohen Bitumenmenge aus der C60 BP4-S sehr hoch ist. Eine hohe Bitumenmenge in Verbindung mit dem Bindemittel aus der neu hergestellten Schicht könnte zur Bildung eines Schmierfilms führen, welcher die niedrigen Scherwerte erklären könnte.

Generell sind die Schwankungen sicher nicht nur abhängig von der Bitumenmenge, sondern auch von den sich ändernden Rahmenbedingungen auf den verschiedenen Baustellen (s. Bild 3).

Anhand der Ergebnisse konnte zudem festgestellt werden, dass der Schichtenverbund entweder auf einem durchgehend hohen Niveau von 30-50 kN (wie bei den meisten Probekörpern) oder auf einem niedrigen Niveau von 15-20 kN (dennoch über den Grenzwerten aus der ZTV Asphalt-StB) liegt. Einen mittleren Zustand des Schichtenverbundes gab es nach Einbau nicht. Dies hatte bereits STÖCKERT [2002] in ihrer Dissertation festgestellt.

Neben der Messung der Scherkräfte mittels Abscherversuch nach Leutner wurde der Schichtenverbund mit der Tragfähigkeitsmessung mittels FWD bestimmt. Hierzu wurden, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, die Messungen ausgewertet. Ziel dieser Messung war es, neben der Prüfung des Abscherversuches an einzelnen Bohrkernen die gesamte Baumaßnahme zu erfassen und somit eine größere Datenmenge zur Auswertung der verschiedenen Ansprühmengen und Ansprühmittel zu erfassen.

Der Vergleich der Messwerte aus den Maßnahmen zwischen $M_1h^3_{rel}$ und der Scherkraft zeigt, dass ein linearer Zusammenhang der beiden Messwerte besteht (siehe Bild 69). Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist hier mit 0,702 angegeben, welcher für einen mittleren linearen Zusammenhang steht. Außerdem ist anhand der Verteilung der Einzelwerte der lineare Zusammenhang grafisch ersichtlich. Ist beispielsweise die Scherkraft hoch, so liegt der dazugehörige $M_1h^3_{rel}$ Wert ebenfalls im hohen Bereich. Das gleiche Bild lässt sich mit den niedrigen Scherkräften abzeichnen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass ein hoher $M_1h^3_{rel}$ Wert einen guten Schichtenverbund repräsentiert und bei einem niedrigen $M_1h^3_{rel}$ Wert der Schichtenverbund deutlich schwächer ist.

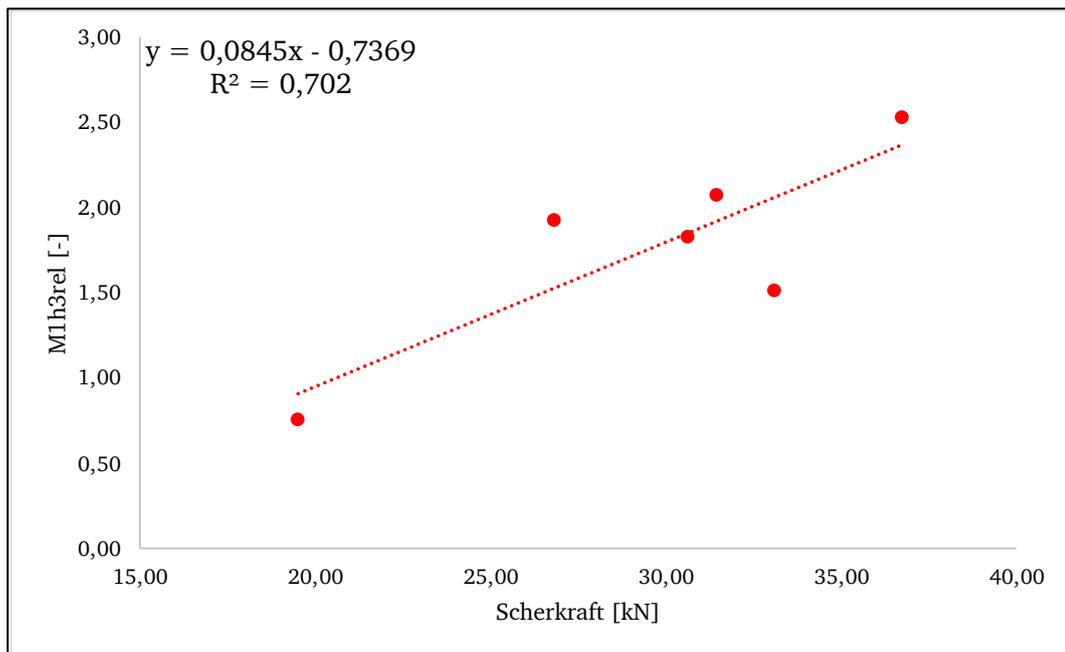


Bild 69: Vergleich Scherkräfte und $M_1h^3_{rel}$

Der Zusammenhang zwischen $M_1h^3_{rel}$ und der Scherkraft genügt nicht, um eine bauvertraglich relevante Entscheidung über ausreichenden und mangelhaften Schichtenverbund zu treffen. Er genügt aber um zerstörungsfrei Abschnitte mit schwachem Schichtenverbund von Abschnitten mit gutem Schichtenverbund zu unterscheiden. Daher geben die dargestellten Bilder in Kapitel 6.3 eine gute Übersicht über den Schichtenverbund innerhalb der Baumaßnahmen.

7.2 Einfluss der Unterlage

Die Unterlage der anzusprühenden Fläche hat einen Einfluss auf die Verteilung der Bitumenemulsionen auf der Unterlage. Durch die niedrige Viskosität der Bitumenemulsionen verteilen sich diese auf gefrästen Unterlagen sehr ungleichmäßig (siehe Bild 20). In Bild 70 sind zwei angesprühete Unterlagen (gefräst a), neu hergestellt b)) gegenübergestellt. Hier ist zu erkennen, dass in Darstellung a) die Bitumenemulsionen in den Frästälern noch hellbraun ist. Die Emulsion ist in diesen Bereichen demzufolge noch nicht vollständig gebrochen, wohingegen auf den Spitzen nur noch das Bitumen zu erkennen ist. Dies lässt auf eine ungleichmäßige Verteilung schließen und bestätigt die Erkenntnisse aus Bild 20.

In Darstellung b) hingegen sieht die Verteilung deutlich gleichmäßiger aus. Hier sammelt sich die Bitumenemulsion zwar auch in den oberflächennahen Hohlräumen, allerdings ist die Oberfläche deutlich ebener, wodurch die Verteilung gleichmäßiger ist und die Emulsion schneller brechen kann.



a)



b)

Bild 70: Vergleich der angesprützten Unterlagen; a) gefräste Unterlage b) neu hergestellte Unterlage

Der Vergleich des Schichtenverbundes für die beiden verschiedenen Unterlagen erfolgt anhand der Ergebnisse des Abscherversuch nach Leutner. Hierzu werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen herangezogen, da diese Probekörper unter den gleichen Bedingungen hergestellt wurden und somit für eine genauere Aussagekraft besser verglichen werden können.

In Bild 71 ist der Vergleich der Scherkräfte in Abhängigkeit von der Ansprühmengen dargestellt. Hierbei lässt sich als erstes Erkenntnis festhalten, dass die Probekörper mit der gefrästen Unterlage im Vergleich zu den Probekörpern einer neu hergestellten Unterlage höhere Scherkräfte erzielen.

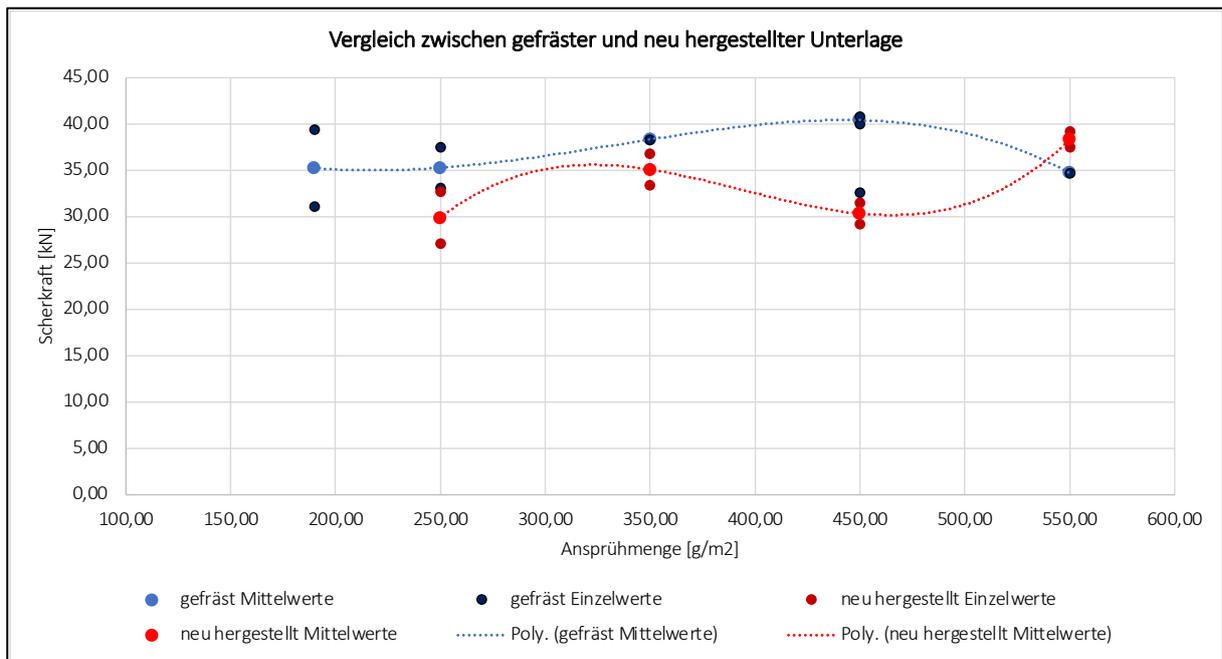


Bild 71: Vergleich der Scherkräfte zwischen geprüfter und neu hergestellter Unterlage

7.3 Einfluss der Temperatur

Während der Baumaßnahmen wurden die Temperaturen des Mischgutes und der Unterlage aufgezeichnet. Die Temperaturen des Mischgutes lagen dabei im Schnitt zwischen 140 °C bis 160 °C, sodass der Einfluss nicht beurteilt werden kann. Die Auswirkung von temperaturreduziertem Mischgut war kein Bestandteil des Forschungsvorhabens und sollte in weiteren Forschungsprojekten untersucht werden.

Hingegen haben die Beobachtungen während der Baumaßnahmen gezeigt, dass die Temperatur der Unterlage und Umgebung (Luft) einen Einfluss hat. Bei hohen Temperaturen im Sommer besteht durch die Temperaturabhängigkeit des Bitumens die Gefahr, dass das Bitumen an den Reifen der LKW's haftenbleibt und dadurch abgetragen wird. Um dieses Problem zu lösen müssen geeignete Lösungen gesucht werden. Eine mögliche Lösung bietet das Ansprühen von Kalkmilch. Dieses Verfahren wurde exemplarisch in einer Maßnahme untersucht. Die Ergebnisse dazu sind im Anhang zu finden.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist eine systematische Untersuchung des Einflusses der Applikation von Anstrichmittel auf die Güte des Schichtenverbundes der so zu verbindenden Asphaltsschichten. Dabei sollte neben der Art auch die Dicke des Anstrichmittels variiert werden und sowie die Art der Oberflächenvorbereitung. Basierend auf den Untersuchungen im Labor und in den Baumaßnahmen sollten die gewonnenen Ergebnisse in diesem Kapitel ausgewertet werden, damit allgemeingültige Empfehlungen formuliert werden können, die den Einsatz von Anstrichmittel und dessen Einfluss auf den Schichtenverbund charakterisieren.

Abschließend sollten Empfehlungen für die Anwendung der verschiedenen Anstrichmengen und Anstrichmittel dargelegt werden.

8.1 Empfehlung für den Einsatz von Anstrichmittel

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von Anstrichmittel für den Schichtenverbund förderlich ist, da die Verklebung zwischen den Schichten einen positiven Einfluss auf den Schichtenverbund hat. Allerdings muss bei der Anwendung von Anstrichmittel beachtet werden, dass die Anwendung mit den richtigen Rahmenbedingungen erfolgt. So haben Schmutz, Niederschlag und weitere Störfaktoren einen negativen Einfluss auf die Anwendung von Anstrichmittel und können zu einer Verringerung des Schichtenverbundes führen.

Für einen erfolgreichen Einsatz von Anstrichmittel sollten folgende Empfehlungen beachtet werden:

- Wahl der Anstrichmenge: Die Wahl der Anstrichmenge ist von mehreren Faktoren abhängig. Hierbei ist unter anderem die Unterlage (gefräst, neu hergestellt) entscheidend (siehe Kapitel 8.2).
- Vorbereitung der Unterlage: Die Unterlage muss vollständig trocken und gereinigt sein. Schmutz führt zu geringerem Schichtenverbund.
- Einbau-/Anstrichbedingungen (Wetter): Der Einbau/das Anstrichen darf nur bei trockenen Bedingungen erfolgen. Es sollte auf jeden Fall auf einen Einbau/ein Anstrichen bei Regen oder nassen Bedingungen verzichtet werden. Bei dem Anstrichvorgang könnte dadurch die aufgetragene Bitumenemulsion abgetragen werden. Während des Einbaues besteht die Gefahr das Wasser eingeschlossen wird, wodurch der Schichtenverbund geschädigt werden kann. Der Einbau bei Regen ändert die Zusammensetzung der Emulsion und beeinflusst den Brechvorgang.
- Schutz der angespröhten Fläche: Die angespröhte Unterlage muss vor Störfaktoren geschützt werden. Durch den Baustellenverkehr kann Schmutz eingetragen und die Bitumenemulsion abgefahren werden. Dies führt zu Störfstellen im Schichtenverbund. Aus diesem Grund ist die angespröhte Fläche vor diesen Einflussfaktoren zu schützen.

8.2 Empfehlung für die Ansprühmenge

Neben den grundsätzlichen Empfehlungen (Vorbereitung der Unterlage; Einbau-/Ansprühbedingungen etc.) ist die Wahl des Ansprühmittels und damit verbundene Ansprühmenge relevant. Untersucht wurden in diesem Forschungsprojekt die beiden Bitumenemulsion aus der ZTV Asphalt-StB (C40 B5-S & C60 BP4-S).

Um für die verschiedenen in der Praxis anzuwendenden Fälle Aussagen treffen zu können, wurden die Ergebnisse der Baumaßnahmen in die verschiedenen Arten der Unterlagen eingeteilt. Die Erkenntnisse sind in Bild 72, Bild 73 und Bild 74 zu erkennen.

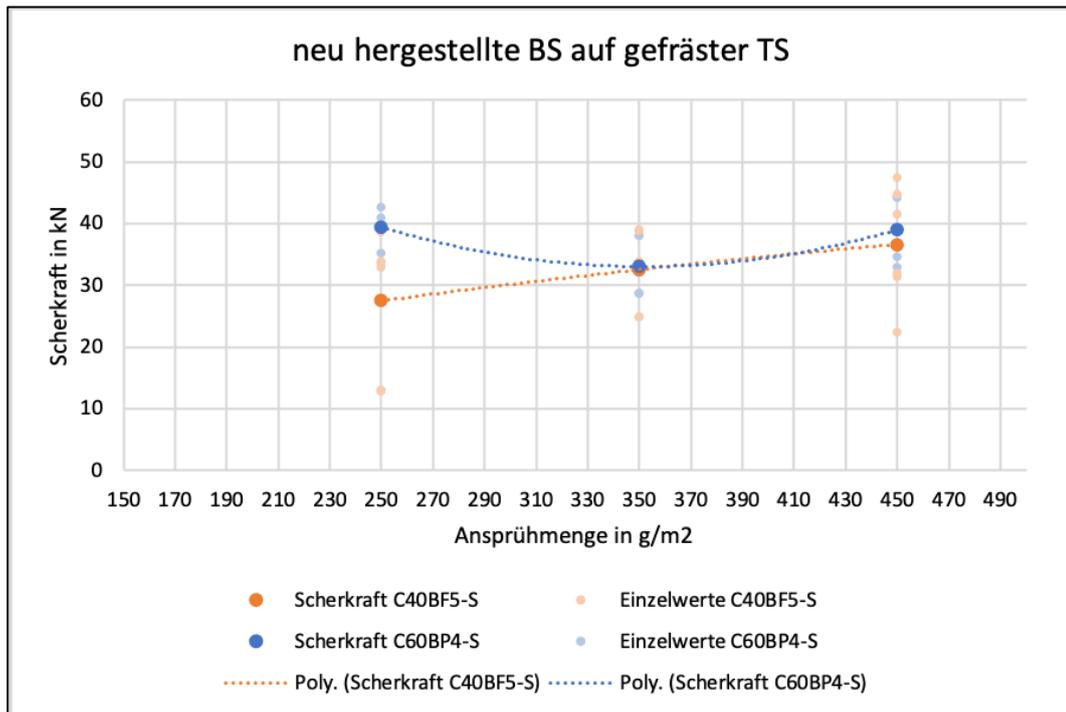


Bild 72: Scherkräfte für neu hergestellte Binderschichten auf gefrästen Tragschichten

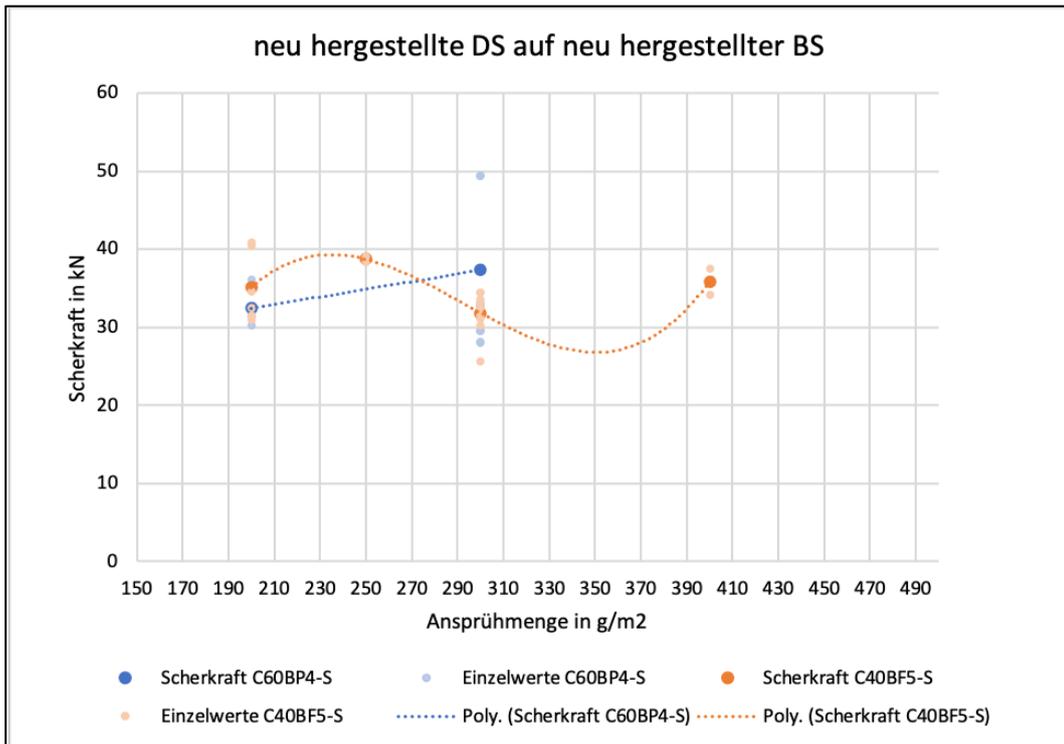


Bild 73: Scherkräfte für neu hergestellte Deckschichten auf neu hergestellten Binderschichten

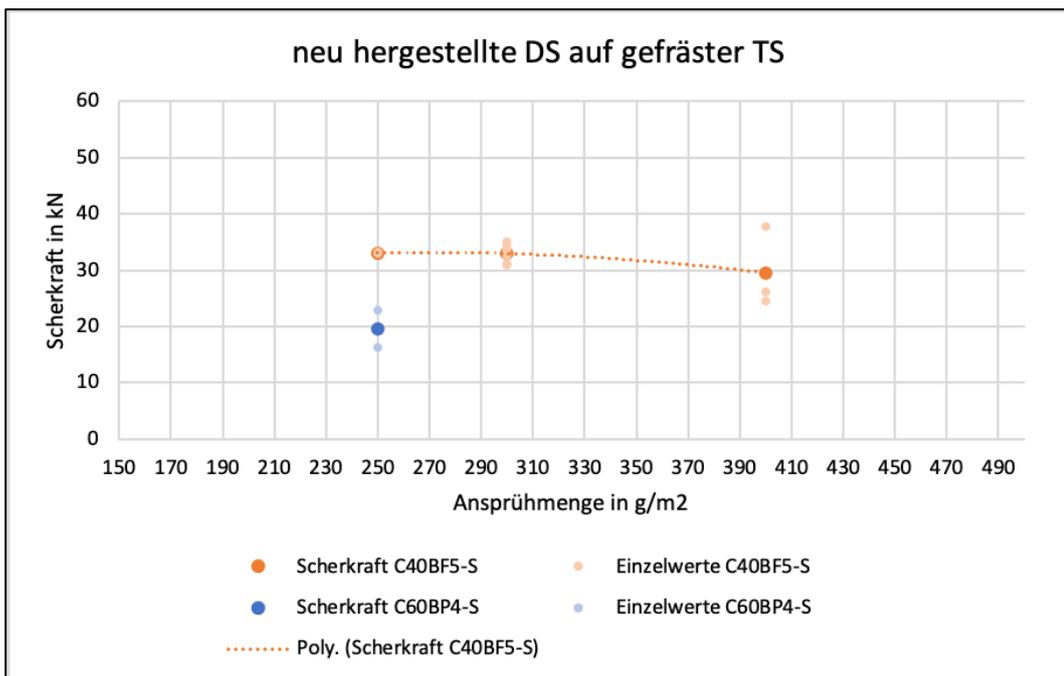


Bild 74: Scherkräfte für neu hergestellte Deckschichten auf gefrästen Tragschichten

Die Ergebnisse und Erkenntnisse haben bestätigt, dass beide eingesetzten Bitumenemulsionen für die Anwendung als Anstrichmittel geeignet sind. In der nachfolgenden Tabelle sind basierend auf den Erkenntnissen aus dem Labor und aus den Baumaßnahmen die Empfehlungen für die Anstrichmenge je g/m² dargestellt.

In den Untersuchungen zeigte sich, dass der Schichtenverbund bei variierenden Ansprühmengen oberhalb der geforderten Grenzwerte (12 kN & 15 kN) lag. Der Schichtenverbund lag nur bei zwei Maßnahmen knapp oberhalb der Grenzwerte. Bei einer dieser Maßnahmen konnte eine Verschmutzung der Unterlage festgestellt werden.

Aus den Tabelle 23 und Tabelle 25 wird ersichtlich, dass für die Ansprühmenge eine Mindestmenge nicht unterschritten und eine Maximalmenge nicht überschritten werden sollte. Es empfiehlt sich die Ansprühmittel je nach Rahmenbedingungen der Maßnahmen vor Ort im Rahmen der empfohlenen Ansprühmengen festzulegen.

Zum Vergleich sind jeweils darunter in Tabelle 24 und Tabelle 26 die aktuellen Empfehlungen aus der ZTV Asphalt-StB und in Tabelle 27 die Empfehlungen aus dem Arbeitskreis 7.4.3 der FGSV für die zukünftige Dosierung dargestellt.

Art und Beschaffenheit der Unterlage	Aufzubringende Schicht	
	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht
	C40 B5-S in g/m ²	
neu hergestellt	k.a.	250 bis 400
gefräst	350 bis 450	250 bis 400

Tabelle 23: Empfehlung für die Ansprühmengen der Bitumenemulsion C40 B5-S aus diesem Forschungsprojekt

Art und Beschaffenheit der Unterlage		Aufzubringende Schicht	
		Asphalttragschicht	Asphaltdeckschicht aus Splittmastix-asphalt oder Asphaltbeton
		Ansprühmenge C40BF1-S in g/m ²	
Asphalttragschicht	f	200 bis 300	200 bis 300
	gf	300 bis 400	200 bis 300
	o/a	350 bis 450	300 bis 400
Erläuterungen:			
f = frisch			
gf = gefräst			
o/a = sehr offenporig oder ausgemagert bzw. Kornausbruch			

Tabelle 24: Art und Dosierung der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion nach ZTV Asphalt-StB 07/13

Art und Beschaffenheit der Unterlage	Aufzubringende Schicht	
	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht
	C60 BP4-S in g/m ²	
neu hergestellt	k.a.	200 bis 300
gefräst	250 bis 450	200 bis 350

Tabelle 25: Empfehlung für die Ansprühmengen der Bitumenemulsion C60 BP4-S aus diesem Forschungsprojekt

Art und Beschaffenheit der Unterlage		Aufzubringende Schicht		
		Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton
		Ansprühmenge C60BP1-S in g/m ²		
Asphalttragschicht	f	150 bis 250	250 bis 350	X
	gf	250 bis 350	250 bis 350	X
	o/a	300 bis 400	300 bis 500	X
Asphaltbinderschicht	f	-	X	150 bis 250
	gf	-	250 bis 350	250 bis 350
	o/a	-	300 bis 500	250 bis 350

Erläuterungen:
f = frisch
gf = gefräst
o/a = sehr offenporig oder ausgemagert bzw. Kornausbruch
X = sind objektbezogen zu betrachten
 - = sollte nicht vorkommen

Tabelle 26: Art und Dosierung der polymermodifizierten Bitumenemulsion nach ZTV Asphalt-StB 07/13

Art und Beschaffenheit der Asphaltunterlage		Aufzubringende Asphalt(schicht/-)lage				
		Asphalttragschicht			Asphaltdeckschicht aus	
		Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	Asphalttragdeckschicht	Splittmastixasphalt und Asphaltbeton	Offenporigem Asphalt
		Ansprühmenge C40B5-S in g/m ² (C60BP4-S in g/m ²)*				
angefräste Unterlage	geschlossen / dicht / feinstrukturiert	250-350	250-350	250-350	250-350	200
	ausgemagert / offenporig / grobstrukturiert	350-450	350-450	350-450	300-400	X
nicht gefräste Unterlage	geschlossen / dicht	X	200-300	200-300	200-300	X
	ausgemagert / offenporig	X	300-400	300-400	300-400	

Erläuterungen:

* (C60BP4-S in g/m²): Anwendung in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen wie z.B. Bauzeiten, Jahreszeit/Witterung, Beschaffenheit der Unterlage möglich
 X sind objektbezogen zu betrachten

Tabelle 27: Überarbeitete Empfehlungen für die zukünftige Dosierung der Bitumenemulsionen vom Arbeitskreis 7.4.3

Für beide Emulsionen wird festgestellt, dass den geplanten Empfehlungen (Tabelle 24 und Tabelle 26) für die Dosierung der Ansprühmengen grundsätzlich zugestimmt werden kann. Lediglich minimale Änderungen für die Empfehlungen der Dosierung gehen aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes hervor. Für einige Fälle konnte keine abschließende Empfehlung entwickelt werden, da keine Ergebnisse aus Baumaßnahmen vorlagen.

Beide Emulsionen können für die beschriebenen Fälle mit den in den Tabellen genannten Ansprühmengen eingesetzt werden. Es konnten für keinen Anwendungsfall Vorteile einer Emulsion gegenüber einer anderen festgestellt werden.

Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Mengen guter Schichtenverbund herstellbar war. Dies bestätigen auch die Laborversuche. Dies legt nahe im Regelfall stets die Minimalmenge zu nutzen. Dies würde sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit und den Ressourcenverbrauch auswirken. Dennoch sollten immer zunächst die jeweiligen Rahmenbedingungen geprüft werden. Insbesondere wenn die Unterlage verschmutzt oder sehr offenporig (zugängliche Hohlräume an der Oberfläche) ist wird eine höhere Menge erforderlich.

Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens haben bestätigt, dass der Einsatz von Ansprühmittel für die Herstellung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes zielführend ist. Allerdings haben die Ergebnisse und Beobachtungen auch gezeigt, dass die Anwendung von Ansprühmitteln sorgfältig ausgeführt werden muss. Sobald die Unterlage verschmutzt oder nass ist, ist der Schichtenverbund gefährdet. Außerdem hat der Vergleich zwischen den Laborergebnissen und den Ergebnissen aus den Baumaßnahmen gezeigt, dass die Herstellung des Schichtenverbundes sehr stark den jeweiligen Umwelteinflüssen unterliegt. Die Ergebnisse der Baumaßnahmen weisen aufgrund ihrer wechselnden Bedingungen sehr starke Schwankungen bei identischen Ansprühmengen auf.

Bei der Untersuchung der Lage der Bitumenemulsion im System hat sich gezeigt, dass insbesondere auf Fräsflächen die Bitumenemulsionen im Regelwerk aufgrund ihrer Zusammensetzungen und Beschaffenheit dazu neigen, in die Frästäler zu laufen. Hier besteht noch ein großer Optimierungsbedarf, sodass Bitumenemulsionen (Ansprühmittel) zukünftig auch zielführend auf wechselnden Unterlagen und bei größeren Quer- und Längsneigungen der Straße eingesetzt werden können. Dafür muss insbesondere an der Viskosität der Bitumenemulsion geforscht werden.

Für die Entwicklung optimierter Bitumenemulsionen muss die Maschinenteknik angepasst werden, sodass zukünftig Bitumenemulsionen von niedrig bis hochviskos je nach Anforderung sicher und zielführend appliziert werden können.

Dringender Forschungsbedarf, der innerhalb dieses Forschungsprojektes nicht betrachtet werden konnte, ergibt sich durch die Temperaturreduzierung des Mischgutes während des Einbaues. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die mit den Erkenntnissen aus diesem Forschungsvorhaben verglichen werden können. Anhand des Vergleiches kann die Auswirkung der Temperaturreduzierung auf den Schichtenverbund bestimmt werden.

Unbekannt ist auch der Einfluss der Bitumenalterung auf den Schichtenverbund. In einigen Forschungsarbeiten wurde dies bereits ansatzweise untersucht. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet. Sinnvoll wäre es deshalb die hier hergestellten Strecken weiterhin zu untersuchen und zu beobachten. Die Strecken der Baumaßnahmen sind mit GPS aufgenommen wurden, die Daten können für die zukünftige Forschung zur Verfügung gestellt werden. So wäre es außerdem möglich, die Belastung der Straße zu berücksichtigen und dadurch die Empfehlungen für die Ansprühmengen und -mittel anhand der Straßenbelastung anzupassen.

Neben der Optimierung der Materialien und Untersuchung der Veränderungen der Einbaubedingungen besteht weiterer Forschungsbedarf für das grundlegende Verständnis des Schichtenverbundes. In wenigen Forschungsarbeiten wurde bereits versucht das Materialverhalten an der Schichtgrenze mittels Prüfverfahren zu definieren und die Anteile der Verklebung, Verzahnung und Reibung zu beschreiben. Dies sollte weitergeführt werden, sodass ein genaueres Verständnis über das Verhalten an der Schichtgrenze definiert werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Forschung können dann wiederum für die Optimierung der Materialien genutzt werden.

Literatur

Al-Qadi, I. L., Carpenter, S. H., Leng, Z., Ozer, H., & Trepanier, J. S. (2008). *Track coat optimization for HMA overlays: Laboratory testing* (Illinois Center for Transportation).

Asphalt Institute, & AEMA. (1997). *A Basic Asphalt Emulsion Manual, Series No. 19*.

Čičković, M., & Bald, J. S. (2017). *Rückrechnung der charakteristischen mechanischen Parameter von Verkehrsbefestigungen aus FWD-Messungen*. 950–957.

Čičković, M., Bald, J. S., & Middendorf, M. (2020). *Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen* [Schlussbericht FE 04.0318/2018/MRB].

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2012). *DIN EN 14770, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR); Deutsche Fassung EN 14770:2012*. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2292068>

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2015a). *DIN EN 1426:2015-09, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration; Deutsche Fassung EN 1426:2015*. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2292039>

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2015b). *DIN EN 1427:2015-09, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren; Deutsche Fassung EN 1427:2015*. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2292069>

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2015c). *DIN EN 16659, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test); Deutsche Fassung EN 16659:2015*. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2292068>

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017). *DIN EN 13398, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen; Deutsche Fassung EN 13398:2017*. Beuth Verlag GmbH.

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (1990). *Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen*. FGSV-Verlag.

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (2007). *TP Asphalt-StB Teil 33 Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)*. FGSV-Verlag.

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (2008). *Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1. Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung—Asphaltbauweise*.

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (2012). *TP Asphalt-StB Teil 80 Abscherversuch*. FGSV-Verlag.

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (2013). *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt*. FGSV-Verlag.

- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (2014). *Arbeitspapier. Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen. Teil C 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD). Auswertung und Bewertung—Asphaltbauweise (AP Trag Teil C 2.1)*. FGSV-Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. (2017). *Hinweise zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes bei Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt*. FGSV-Verlag.
- GFM (Hrsg.). (2008). *Handbuch Optische 3D-Messgerät MikroCAD*. GFMesstechnik GmbH.
- Glet, W. (2003). *Fünf Stufen Modell für das Abbinden von Bitumen-Emulsion im Straßenbau*.
- Grätz, B. (2009). *Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmentearten* [Habilitationsschrift]. Technische Universität Darmstadt.
- Holl. (2004). *Bitumen-Emulsion in Straßenerhalt und Straßenbau*. Fachverband für Bitumenemulsion und Straßenerhaltungsbauweise e.V.
- Holl, A. (1976). Spritz- und Anstricharbeiten beim Heißeinbau von Asphalt. *Straßen und Tiefbau*.
- Jaskuła, P. (2014). Influence of compaction effectiveness on interlayer bonding of asphalt layers. *The 9th International Conference „Environmental Engineering 2014“*. The 9th International Conference „Environmental Engineering 2014“, Vilnius, Lithuania.
- Kruntcheva, M. R., Collop, A. C., & Thom, N. H. (2005). Effect of Bond Condition on Flexible Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering*, 131(11), 880–888. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:11\(880\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:11(880))
- Leutner, R., Renken, P., & Lobach, T. (2004). *Auswirkung unterschiedlicher Verbundsysteme auf die mechanischen Eigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaket* (AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13339N) [Forschungsbericht]. Technische Universität Braunschweig.
- Metelmann, & Beecken. (1979). Über die Verwendung von Anspritzmitteln im Straßenbau. *Straße und Autobahn, Heft 5*.
- Mohammad, L. N., Bae, A., & Elseifi, M. A. (2009). *Effect of Tack coat materials and application rate on the interface shear strength*. Proceeding of 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control Mairepav, Torino, Italy.
- Mohammad, L. N., Elseifi, A. M., Bae, A., Patel, N., Button, J., & Scherocman, J. A. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement* (National Cooperative Highway Research Program, S. 13652). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/13652>
- Nouryon Chemicals Holding B.V. (o. J.). *Bitumen emulsion*.
- Raab, C., & Partl, M. N. (2017). *Leistungsfähigkeit von Haftkleber in der Praxis*.
- Renken, P., & Lobach, T. (2004). *Auswirkung unterschiedlicher Verbundsysteme auf die mechanischen Eigenschaften eines mehrschichtigen Asphaltpaketes*.
- SFERB. (2008). *Les emulsions de bitume*.

- Stoch, H. (1978). Sinnvolle Anwendung von Vorspritzmittel im bituminösen Straßenbau. *Straße und Autobahn*.
- Stöckert, U. (2002). *Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau* [PhD]. Technische Universität Darmstadt.
- Weber, R. (1991). *Rißbildung in Asphaltstraßen als Folge mangelhaften Schichtenverbundes* [PhD]. Technische Universität München.
- West, R. C., Zhang, J., & Moore, J. (2005). Evaluation of bond strength between pavement layers. *National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-08*.
- Wistuba, M., & Walther, A. (2013). Auswirkungen des Schichtenverbundes auf die theoretische Lebensdauer von Straßenbefestigungen aus Asphalt. *Straße und Autobahn 64, Heft 7*.
- Wistuba, M., & Wellner, F. (2016). *Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt* [Forschungsbericht]. Technische Universität Dresden.
- Zhang, W. (2017). Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States. *International Journal of Pavement Research and Technology, 10(5)*, 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.003>

Bilder

Bild 5 und 6 (Auszüge aus dem FGSV-Regelwerk „AP 25/B 5.1 Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen Abschnitt B 5.1: Einfluß des Schichtenverbundes auf das Verhalten von Asphaltbefestigungen“, Ausgabe 1990), sind mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

- Bild 1: Darstellung der Ziele im Rahmen des Forschungsvorhabens
- Bild 2: Unterschied zwischen idealem und wirklichem Verbund (Holl, 1976)
- Bild 3: Einflüsse auf den Schichtenverbund nach (Stöckert, 2002)
- Bild 4: Unterschied zwischen vollständigem Verbund und keinem Verbund bezüglich des Spannungsverlaufes (Weber, 1991)
- Bild 5: Biegezugspannung an der Unterseite der Asphalttragschicht für ein 50 kN Einzelrad (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 1990)
- Bild 6: Abnahme der Nutzungsdauer infolge von Biegezugbeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 1990)
- Bild 7: Berechnung der Lebensdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Schichtenverbund (Metelmann & Beecken, 1979)
- Bild 8: Minersumme bei variierenden Verbundfaktoren (Wistuba & Walther, 2013)
- Bild 9: Zeitstrahl der Entwicklung der Bitumenemulsion
- Bild 10: Kationische Bitumenemulsion (Holl, 2004)
- Bild 11: Einstellung der Applikationsanlage nach (Mohammad et al., 2012)
- Bild 12: Ausbau der gefrästen Platten
- Bild 13: Gegenüberstellung des farbcodiertem Höhenbild und dem Live-Kamerabild (GFM, 2008)
- Bild 14: Schnittbild mit Bemaßung (GFM, 2008)
- Bild 15: Aufbau der Ansprühanlage
- Bild 16: Ansprühanlage – Ansicht vorne mit Antriebskopf
- Bild 17: Ansprühanlage – Rückansicht mit Fahrgestell
- Bild 18: Verteilung Bitumenemulsion C40BF5-S
- Bild 19: Verteilung Bitumenemulsion C60BP4-S
- Bild 20: Messung der Verteilung der Bitumenemulsion
- Bild 21: Ergebnisse Versuchsreihe 1 gefräste Unterlage je Ansprühmenge
- Bild 22: Ergebnisse Versuchsreihe 1 gefräste Unterlage je Bitumenmenge
- Bild 23: Ergebnisse Versuchsreihe 2 gefräste Unterlage je Ansprühmenge
- Bild 24: Ergebnisse Versuchsreihe 3 neu hergestellte Unterlage je Ansprühmenge
- Bild 25: Scherfläche Bohrkern
- Bild 26: Vergleich der komplexen Schubmoduln von C60 BP4-S und C40 BF5-S
- Bild 27: Vergleich der Phasenwinkel von C60 BP4-S und C40 BF5-S
- Bild 28: Black Diagramm von C60 BP4-S und C40 BF5-S
- Bild 29: Darstellung der Varianten
- Bild 30: Baumaßnahme B420 Fürfeld
- Bild 31: Vergleich angesprühter Bereich (links) und nicht angesprühter Bereich (rechts)

- Bild 32: Baumaßnahme B 48 Umgehung Alsenz
- Bild 33: Fräsfläche B 48 Umgehung Alsenz
- Bild 34: Einbau B48 Umgehung Alsenz
- Bild 35: Baumaßnahme L211 Bad Urach-Grabenstetten
- Bild 36: Applikation der Kalkmilch
- Bild 37: Baumaßnahme B10 Münchweiler
- Bild 38: Maßnahme B19 OD Künzelsau
- Bild 39: FWD-Messgerät
- Bild 40: Befestigungsmodell - Platte auf elastisch-isotropem Halbraum (Grätz, 2009)
- Bild 41: Schematische Darstellung elastische Länge (Čičković et al., 2020)
- Bild 42: Messpunkte der Temperaturmessungen
- Bild 43: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen von C 40 B5-S - Einbau Binderschicht - Fürfeld
- Bild 44: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen von C 40 B5-S - Einbau Deckschicht - Fürfeld
- Bild 45: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen – Alsenz
- Bild 46: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen - Einbau Binderschicht - Münchweiler
- Bild 47: Temperatur Unterlage nach dem Ansprühen - Einbau Deckschicht - Münchweiler
- Bild 48: Temperatur Mischgut Einbau Binderschicht - Fürfeld
- Bild 49: Temperatur Mischgut Einbau Deckschicht - Fürfeld
- Bild 50: Temperatur Mischgut – Alsenz
- Bild 51: Temperatur Mischgut - Einbau Binderschicht - Münchweiler
- Bild 52: Temperatur Mischgut - Einbau Deckschicht - Münchweiler
- Bild 53: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Tragschicht gefräster Unterlage - Alsenz
- Bild 54: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage – Fürfeld
- Bild 55: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Fürfeld
- Bild 56: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht neu hergestellte Unterlage – Künzelsau
- Bild 57: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Künzelsau
- Bild 58: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage - Münchweiler
- Bild 59: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Münchweiler
- Bild 60: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage – Bad Urach
- Bild 61: Ergebnisse zwischen Asphaltdeckschicht/Binderschicht neu hergestellte Unterlage – Bad Urach
- Bild 62: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht – Alsenz
- Bild 63: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht - Fürfeld
- Bild 64: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht – Künzelsau
- Bild 65: Veränderung der charakteristischen Steifigkeit der lastverteilenden Schicht - Münchweiler
- Bild 66: Vergleich Bitumenemulsionen auf gefräster Unterlage – Baumaßnahmen
- Bild 67: Vergleich Bitumenemulsionen auf gefräster Unterlage - Laborversuche
- Bild 68: Vergleich Bitumenemulsionen auf neu hergestellter Unterlage – Baumaßnahmen
- Bild 69: Vergleich Scherkräfte und $M_1 h^3_{rel}$
- Bild 70: Vergleich der angesprühten Unterlagen; a) gefräste Unterlage b) neu hergestellte Unterlage
- Bild 71: Vergleich der Scherkräfte zwischen gefräster und neu hergestellter Unterlage

- Bild 72: Scherkräfte für neu hergestellte Binderschichten auf gefrästen Tragschichten
- Bild 73: Scherkräfte für neu hergestellte Deckschichten auf neu hergestellten Binderschichten
- Bild 74: Scherkräfte für neu hergestellte Deckschichten auf gefrästen Tragschichten
- Bild 75: Angesprühte Kalkmilch
- Bild 76: LKW Spur auf der angesprühten Fläche
- Bild 77: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage - Münchweiler
- Bild 78: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellt Unterlage - Münchweiler
- Bild 79: Lage der Messpunkte - Fürfeld
- Bild 80: Übersicht Erstmessung B 420 - M_0
- Bild 81: Übersicht Erstmessung B 420 - M_1h^3
- Bild 82: Übersicht Folgemessung B 420 - M_0
- Bild 83: Übersicht Folgemessung B 420 - M_1h^3
- Bild 84: Lage der Messpunkte – Alsenz
- Bild 85: Übersicht Erstmessung B 48 - M_0
- Bild 86: Übersicht Erstmessung B 48 - M_1h^3
- Bild 87: Übersicht Folgemessung B 48 - M_0
- Bild 88: Übersicht Folgemessung B 48 - M_1h^3

Tabellen

Tabelle 1 (Auszug aus Heft 799, Ausgabe 2013) und Tabelle 20 (Auszug aus Heft FGSV 443 C 2.1, Ausgabe 2014) sind mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

- Tabelle 1: Art und Dosierung der polymermodifizierten Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Unterlage in den Belastungsklassen Bk100 bis Bk3,2 (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2013)
- Tabelle 2: Art und Dosierung der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Belastungsklasse Bk1,8 und Bk0,3
- Tabelle 3: Dosierung in Abhängigkeit von der zu überbauenden Asphaltsschicht/-lage in den Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 0,3
- Tabelle 4: Dosierung der Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Asphaltunterlage in den Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 0,3
- Tabelle 5: Abfüll-, Lager- und Verarbeitungstemperaturen gemäß ZTV Asphalt-StB
- Tabelle 6: Zusammensetzung der gefrästen Asphalttragschicht
- Tabelle 7: Zusammensetzung Mischgut AC 32 TS
- Tabelle 8: Zusammensetzung Mischgut AC 16 BS
- Tabelle 9: Präparationsvarianten der Oberfläche
- Tabelle 10: Vergleich der Messflächengrößen
- Tabelle 11: Eigenschaften C60BP4-S
- Tabelle 12: Eigenschaften C40BF5-S
- Tabelle 13: Ansprühmengen der Probekörper mit C60BP4-S
- Tabelle 14: Ansprühmengen der Probekörper mit C40BF5-S
- Tabelle 15: Ansprühmengen C60BP4-S
- Tabelle 16: Ansprühmengen C40BF5-S
- Tabelle 17: Ergebnisse Standardversuche C60 BP4-S
- Tabelle 18: Ergebnisse Standardversuche C40 BF5-S
- Tabelle 19: Varianten der Versuchsstrecken
- Tabelle 20: Orientierungswerte M_0 (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2014)
- Tabelle 21: Orientierungswerte M_1h^3 (Čičković et al., 2020)
- Tabelle 22: Zeitpunkt FWD-Messung
- Tabelle 23: Empfehlung für die Ansprühmengen der Bitumenemulsion C40 B5-S
- Tabelle 24: Art und Dosierung der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion nach ZTV Asphalt-StB
- Tabelle 25: Empfehlung für die Ansprühmengen der Bitumenemulsion C60 BP4-S
- Tabelle 26: Art und Dosierung der polymermodifizierten Bitumenemulsion nach ZTV Asphalt-StB
- Tabelle 27: Empfehlungen für die zukünftige Dosierung der Bitumenemulsionen

A.1 Einsatz von Kalkmilch

Beobachtungen während des Einsatzes der Kalkmilch

Bei der Baumaßnahme B10 bei Münchweiler wurde eine Kalkmilch zum Schutz der gebrochenen Bitumenemulsion eingesetzt. Das Aufsprühen der Kalkmilch dauerte etwa so lange wie ein entsprechender Ansprühvorgang der Bitumenemulsion. Die Kalkmilch benötigt anschließend ebenfalls eine Abtrocknungszeit, um ihre Schutzwirkung ausüben zu können.

In Bild 75 ist eine mit Kalkmilch angesprühte gebrochene Fläche abgebildet. Augenscheinlich konnte festgestellt werden, dass die Reifen hauptsächlich die Kalkmilch und nicht die Bitumenemulsion abtrugen (siehe Bild 76).

Die Außentemperaturen lagen während des Einbaus bei circa 25°C mit starker Sonneneinstrahlung. Bei der Fläche mit hoher Menge der Bitumenemulsion C60BP4-S konnte eine Klebewirkung der Bitumenemulsion an den Reifen des Baustellenverkehrs beobachtet werden. Dies war bei den Flächen mit Kalkmilch nicht der Fall.



Bild 75: Angesprühte Kalkmilch



Bild 76: LKW Spur auf der angesprühnten Fläche

Schichtenverbund nach Einsatz der Kalkmilch

Bild 77 zeigt den Vergleich von den Varianten mit Kalkmilch und den Varianten ohne Kalkmilch für den Schichtenverbund zwischen Binder- und Tragschicht. Hierbei erzielt die geringste Ansprühmenge der C60 BP4-S mit Kalkmilch den besten Verbund. Die niedrigsten Scherwerte weist die Variante C40 B5-S mit einer Ansprühmenge von 250 g/m² auf. Insgesamt weist die Variante der Kalkmilch sowohl bei der geringeren als auch bei der höheren Ansprühmenge etwas höhere Scherwerte auf.

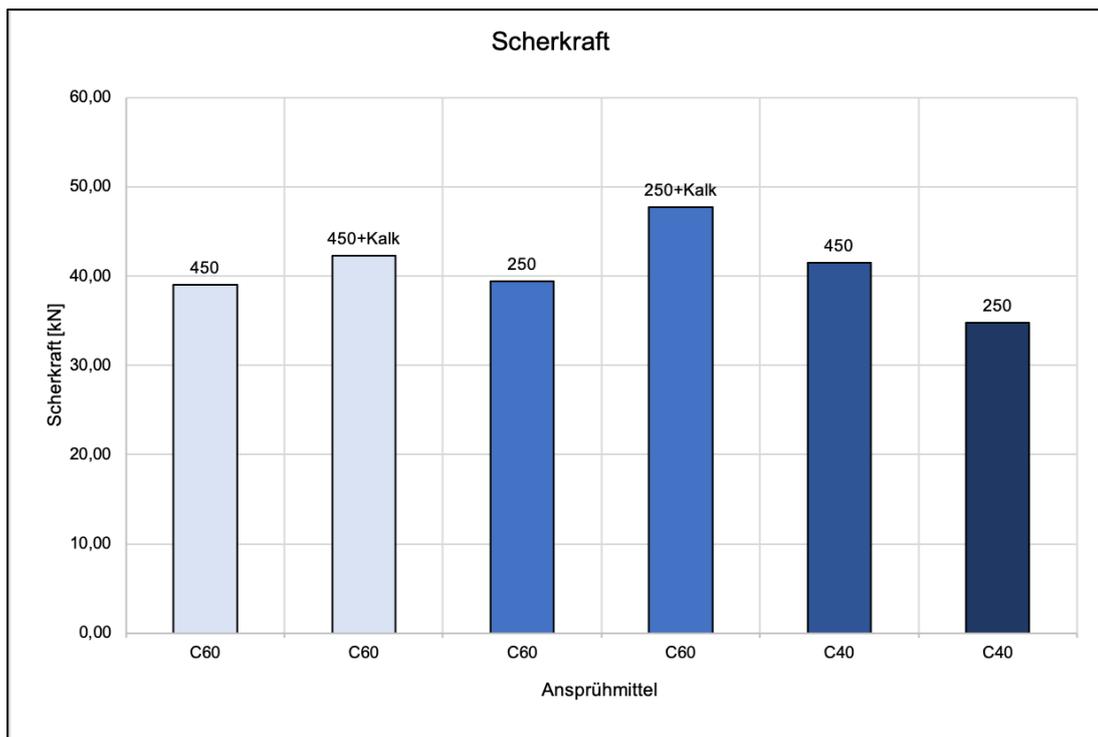


Bild 77: Ergebnisse zwischen Binderschicht/Tragschicht gefräster Unterlage - Münchweiler

In Bild 78 sind die ermittelten Scherkräfte für die Varianten mit der Kalkmilch und den Varianten ohne Kalkmilch zwischen der Asphaltdeckschicht und Binderschicht dargestellt. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig voneinander.

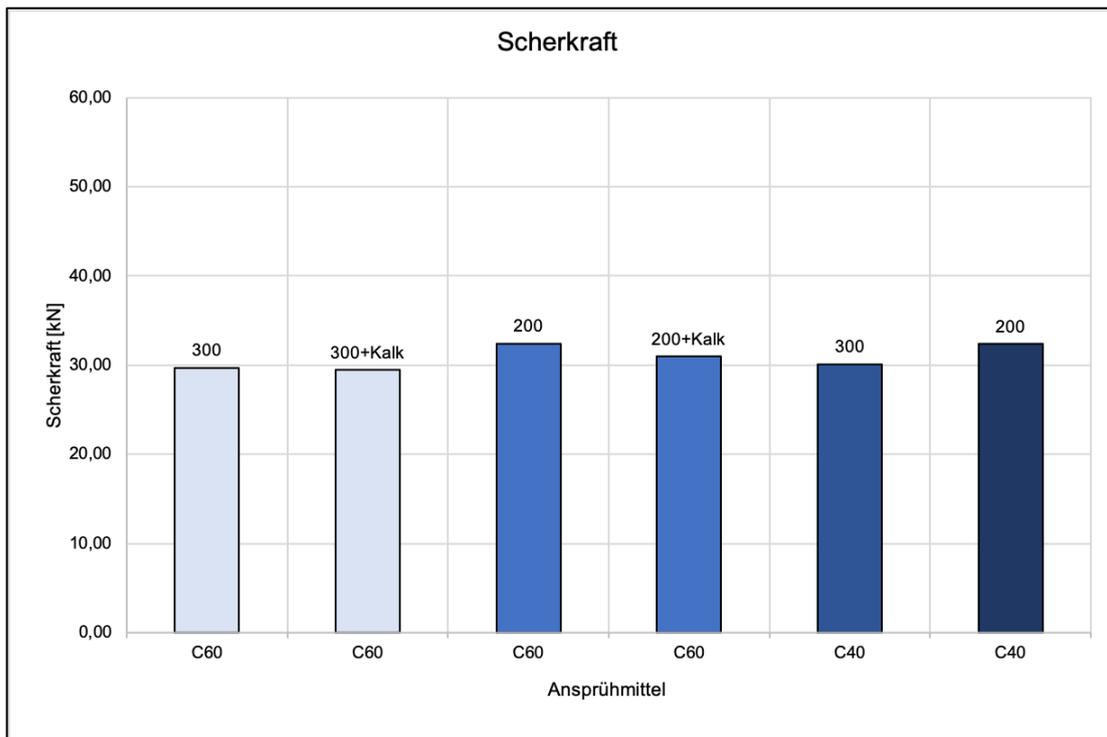


Bild 78: Ergebnisse zwischen Deckschicht/Binderschicht neu hergestellt Unterlage - Münchweiler

Auswirkungen einer möglichen Nachbehandlung mit Kalkmilch

Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurden in einer einzelnen Maßnahme zwei verschiedene Nachbehandlungsmöglichkeiten vergleichend betrachtet. Zum einen wurde das Ansprühmittel standardmäßig aufgesprüht und anschließend überbaut (ohne Nachbehandlung) und zum anderen wurde nach dem Ansprühen von Bitumenemulsion Kalkmilch aufgetragen.

Durch den Vergleich der Flächen mit und ohne Nachbehandlung wird ersichtlich, dass das Auftragen der Kalkmilch zu einer leichten Verbesserung der Scherkräfte führt. Da das Verfahren nur exemplarisch eingesetzt wurde, kann eine abschließende Aussage nicht getroffen werden. In zukünftigen Forschungsverfahren sollte das Verfahren der Kalkmilch weiter erprobt werden. Es lässt sich festhalten, dass hier keine negativen Auswirkungen auf den Schichtenverbund erkennbar waren.

A.2 Messdaten

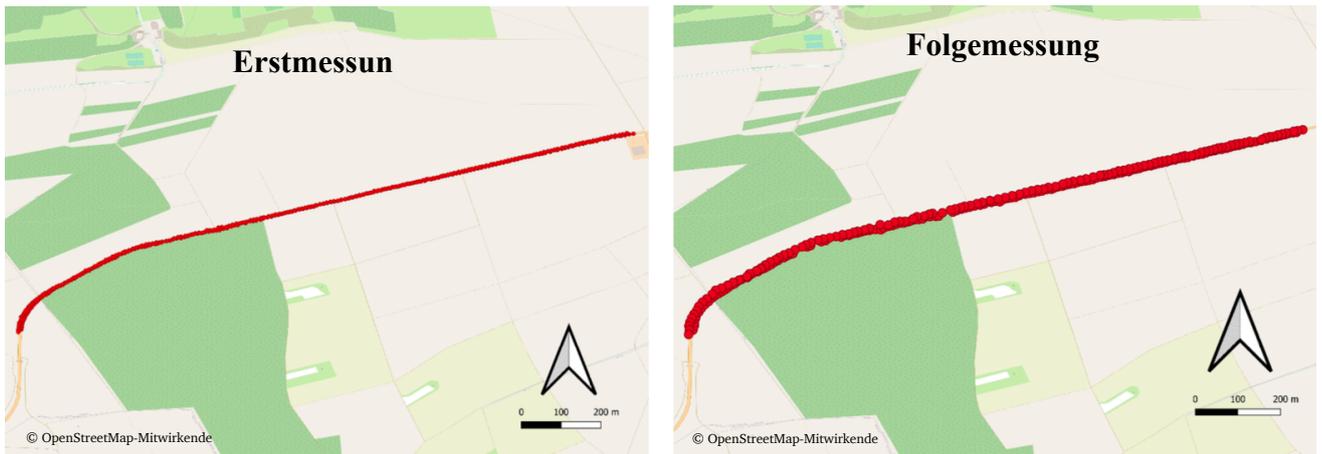


Bild 79: Lage der Messpunkte - Furfeld

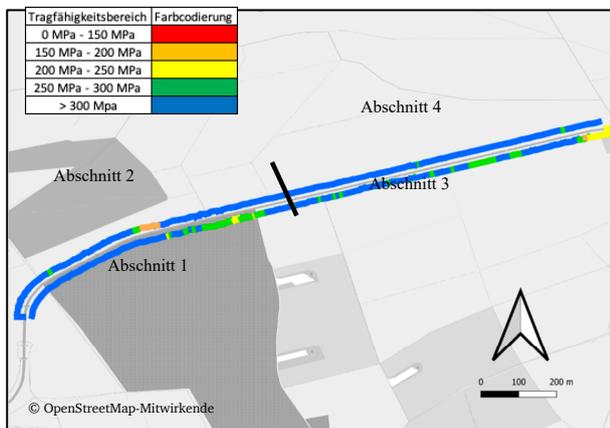


Bild 80: Übersicht Erstmessung B 420 - M_0

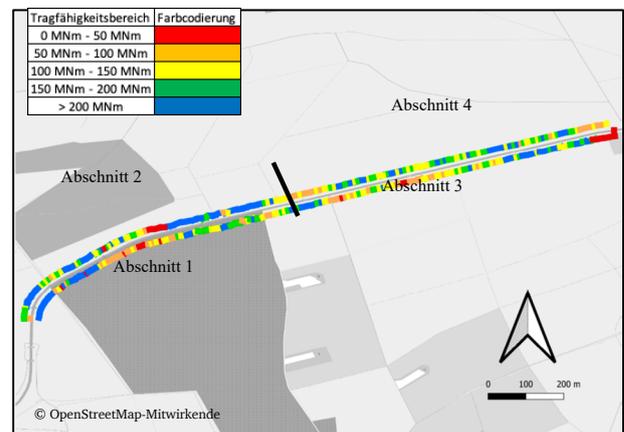


Bild 81: Übersicht Erstmessung B 420 - M_1h^3

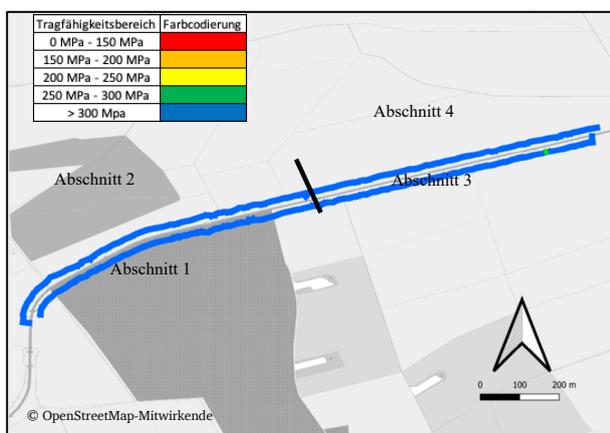


Bild 82: Übersicht Folgemessung B 420 - M_0

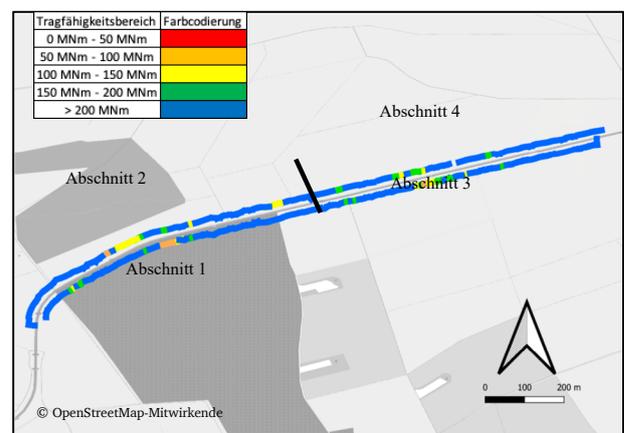


Bild 83: Übersicht Folgemessung B 420 - M_1h^3

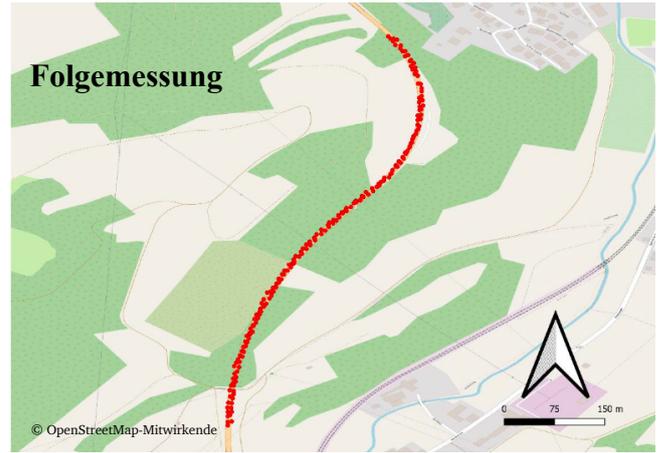
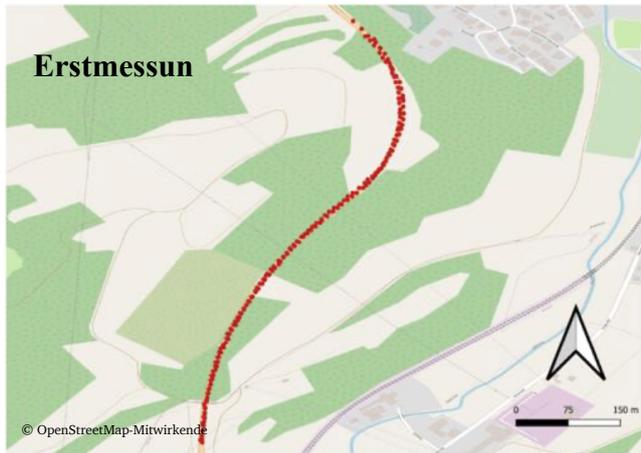


Bild 84: Lage der Messpunkte – Alsens

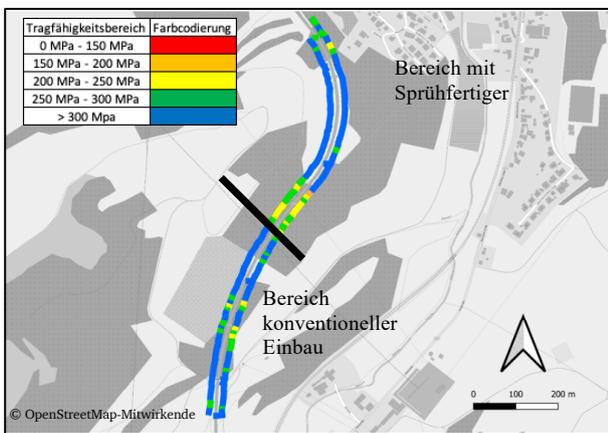


Bild 85: Übersicht Erstmessung B 48 - M_0

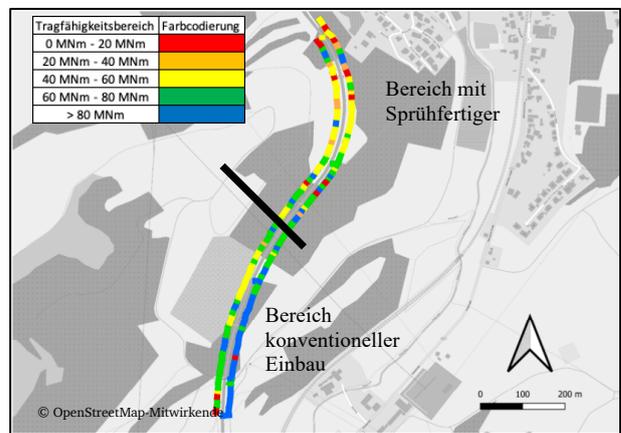


Bild 86: Übersicht Erstmessung B 48 - M_{1h^3}

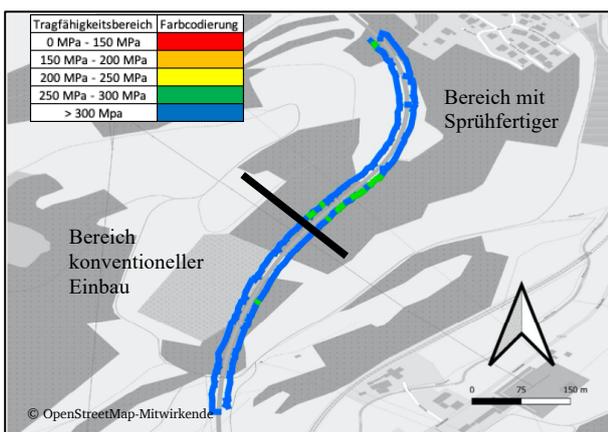


Bild 87: Übersicht Folgemessung B 48 - M_0

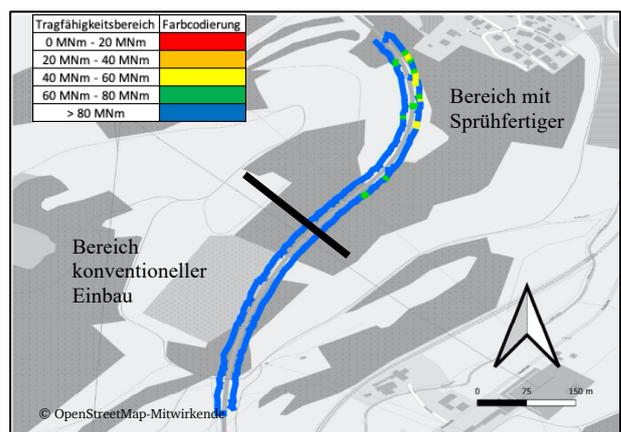


Bild 88: Übersicht Folgemessung B 48 - M_{1h^3}

Schriftenreihe

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

2023

S 198: Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST

Alte-Teigeler, Britz, Kispert, Riwe, Tschernack, Villaret, Lüdike

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

S 199: Identifizierung relevanter Klimaparameter und Bestimmung von Schwellenwerten zu gravitativen Massenbewegungen

Steffen, Brendel

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

S 200: Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbetonen auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

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

S 201: Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen

Breitenbücher, Neumann, Curbach, Baumgärtel

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

2024

S 202: Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren – Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

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

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, Schlee

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 Anstrichmittel zwischen Asphaltsschichten 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

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 978-3-95606-849-2
<https://doi.org/10.60850/bericht-s217>

www.bast.de