

Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 130

bast

Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

von

Martin Radenberg
Sören Holzwarth

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 130

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt E07.0280/2014/EGB:
Entwicklung einer Prüfsystematik für
Porous Mastic Asphalt (PMA)

Fachbetreuung

Oliver Ripke

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-443-2

Bergisch Gladbach, März 2019

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Durch die 2005 im deutschen Bundes-Immissionschutzgesetz [BImSchG] verpflichtend umgesetzte EU-Umgebungslärmrichtlinie kommt lärmindernden Bauweisen eine zunehmende Bedeutung zu. Der PMA hat solche lärmindernden Eigenschaften, die über die Beschaffenheit der Oberflächen-textur entstehen. [BECKENBAUER, 2008]

Er gilt als selbstverdichtend und lässt durch seine überwiegend dichte Struktur neben seinen lärm-technischen Vorzügen auch eine längere Nutzungsdauer erwarten.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die nachhaltige und wirtschaftliche Optimierung der Bauweise PMA anhand der prozesssicheren Ansprache seiner besonderen Materialeigenschaften.

Dieses Gesamtziel sollte durch die Entwicklung und/oder Anpassung einer Prüfsystematik erreicht werden, mit der eine zielsichere Mischgutoptimierung erzeugt wird.

Die temperaturabhängige Mörtelsteifigkeit wurde hierbei besonders betrachtet, um den Effekt der Mörtel-sedimentation und somit die selbstverdichtende Wirkung beim Einbau hinreichend prozesssicher zu erreichen.

Durch gezielte Untersuchung der Mörtelkomponente konnte eine Kenngröße der Mörtelsteifigkeit analysiert werden, welche Auskunft über die zu erwartende Sedimentation und die damit verbundene selbstverdichtende Wirkung gibt. Kenngröße hierfür ist die Ausflussmenge nach 20 Sekunden, die im Ausflussviskosimeter bei einer Prüftemperatur von 160 °C und 180 °C zu ermitteln ist.

Als bewertungsrelevante Probekörper erwiesen sich Bohrkern aus Asphaltprobeplatten. Hierzu wurde ein Herstellungsablauf entwickelt, welcher es ermöglicht eine homogene Ausprägung der zwei Phasen des PMA über die gesamte Fläche des Probekörpers zu gewährleisten.

Als maßgebendes Prüfverfahren zur Beurteilung des Verformungswiderstandes wurde die dynamische

Stempeleindringtiefe an Bohrkernen unter seitlicher Einspannung in einen Edelstahl-Zylinder und Prüfung auf der hohlraumreichen Seite herausgearbeitet.

Development of a test system for Porous Mastic Asphalt (PMA)

The EU Environmental Noise Directive, which was implemented in the German Federal Immission Control Act [BImSchG] in 2005, makes noise-reducing construction increasingly important. The Porous Mastic Asphalt (PMA) has such properties and gets its noise reducing property over the quality of the surface texture. [BECKENBAUER, 2008]

It is self-compacting and due to its predominantly dense structure, a longer useful life can be expected in addition to its noise-related advantages.

The aim of the project was the sustainable and economic optimization of the PMA construction method based on a reliable determination of the special material properties.

This overall objective should be achieved by developing and/or adapting a testing system that ensures purposeful mixture optimization.

In order to reliably achieve the effect of mortar sedimentation and thus the associated self-compacting effect during installation, the temperature-dependent mortar stiffness was particularly considered.

Through targeted examination of the mortar component, a parameter of the mortar stiffness was analyzed, which provides information on the expected sedimentation and the self-compacting effect. The parameter for this is the outflow rate after 20 seconds, which is to be determined in an outflow viscometer at a test temperature of 160 °C and 180 °C.

Drilling cores taken from asphalt test slabs turned out to be suitable specimens for evaluation. For this purpose, a production process was developed, which makes it possible to ensure a homogeneous characteristic of the two phases of the PMA over the entire surface of the specimen.

The decisive test method for evaluating the resistance to deformation was found to be the dynamic indentation test on drilling cores with lateral fixing in a stainless steel cylinder and testing on the porous side.

Summary

Development of a test system for Porous Mastic Asphalt (PMA)

1 Introduction

The EU Environmental Noise Directive, which was implemented in the German Federal Immission Control Act [BImSchG] in 2005, makes noise-reducing construction increasingly important. Besides the Porous Asphalt (PA), which achieves its noise reduction through absorption of sound due to the reduction of aerodynamic processes, asphalt roads with an asphalt surface course of Porous Mastic Asphalt (PMA) were first built in 2008. Such asphalt concepts with dense composition get their noise reducing property over the quality of the surface texture. [BECKENBAUER, 2008]

While porous noise-reducing constructions such as PA are only indicated with average useful lives of eight to ten years, the PMA's predominantly dense structure allows it to have a longer useful life in addition to its noise-related advantages.

At the time of the report, there is no duty to CE-marking for PMA, as it can not be described with [DIN EN 13108, Part 6].

Recommendations for the use and design of PMA asphalt mixtures are given in the worksheet for the execution of asphalt surface course from PMA [AP PMA, 2015].

In addition to the standard values for bituminous mixtures PMA 8 and PMA 5 defined in [AP PMA, 2015], there are separate requirements and recommendations for the building materials to be used with which the process reliability of the construction-practical implementation is to be improved.

The PMA obtains its typical layer structure (Figure 1) through the decay behaviour of the asphalt mortar within the coarse-grained soil skeleton. The lower

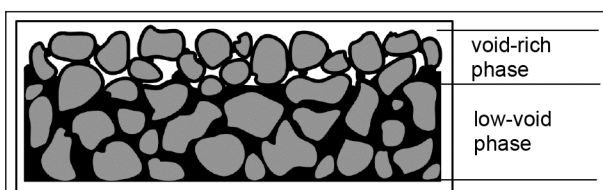


Fig. 1: Schematic sketch of PMA based on [EHLERT, 2013]

zone of the finished layer corresponds to a classic dense graded mastic asphalt. The upper area (about 1/3 of the paving thickness) shows a large proportion of cavities.

According to the leaflet for the temperature reduction of asphalt [M TA, 2011], PMA is considered to be predominantly self-compacting due to its high binder content in the mortar and in combination with the use of viscosity-modifying binders.

With regard to the theoretical basic idea of the self-compacting asphalt concept PMA, however, different experiences exist to reliably depict this effect in the laboratory as well as during installation on the construction site.

This is reflected in particular by the hardly controllable process of sinking the mortar phase. Both in the laboratory and in practice, there are isolated defects due to mortar enrichment on the surface. During installation, it was also observed that the PMA mix is particularly sensitive to installation-specific parameters such as installation temperature, installation speed, standstill of the paver and installation technique.

These findings lead to the need that the PMA should be optimized as best as possible in terms of process reliability.

2 Research aims

The aim of the project was the sustainable and economic optimization of the PMA construction method based on a reliable determination of the special material properties.

This overall objective should be achieved by developing and/or adapting a testing system that ensures purposeful mixture optimization.

In order to reliably achieve the effect of mortar sedimentation and thus the self-compacting effect during installation, the temperature-dependent mortar stiffness was particularly considered.

For this purpose, the components binder, filler and fine aggregate were primarily investigated with regard to the self-compacting properties of PMA.

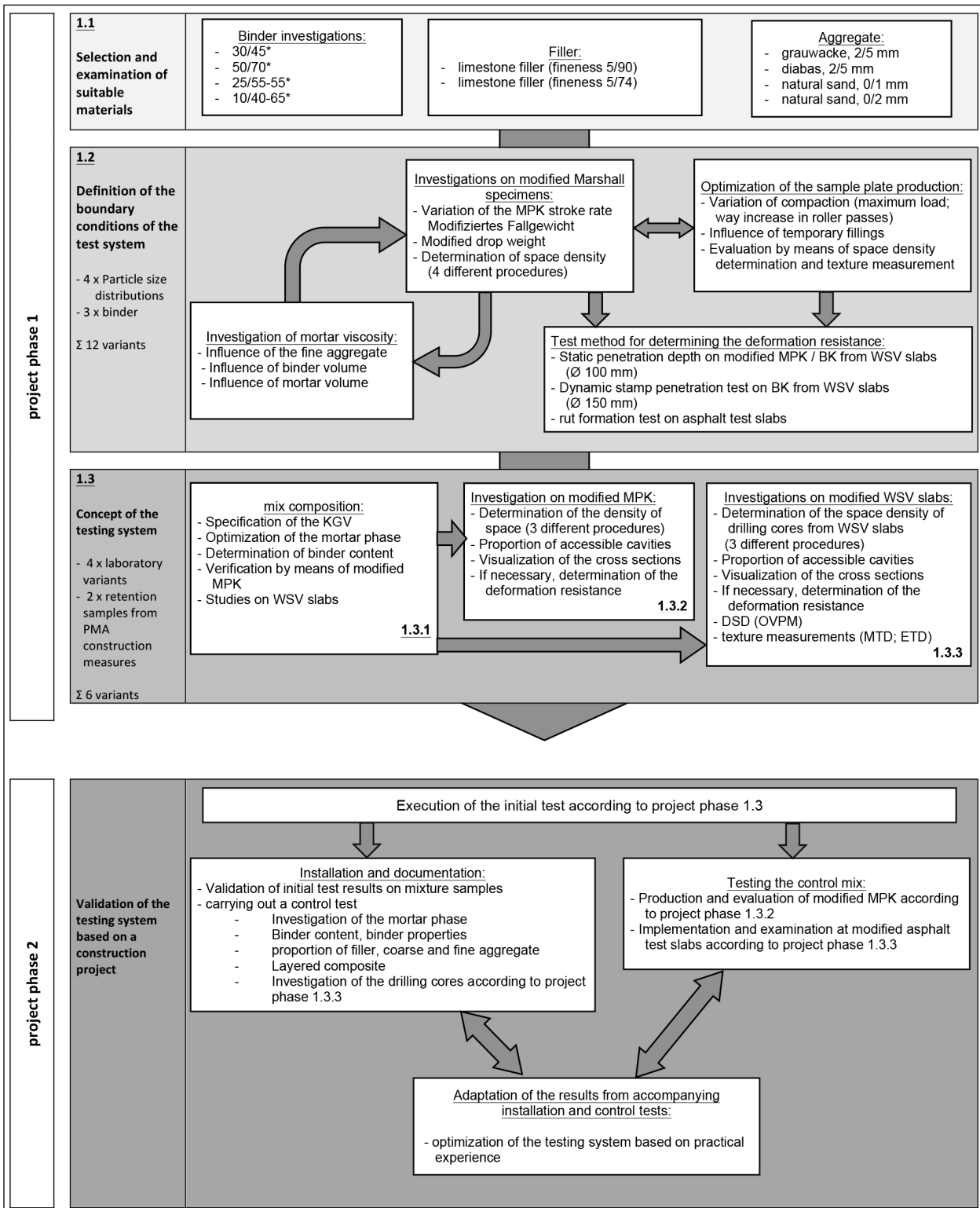


Fig. 2: Flow chart of investigation program

The developed testing system was then validated with retention samples and a project-accompanying construction project.

3 Investigation program

The research project can be subdivided into the two project phases shown in Figure 2

In the first part of the project the laboratory optimization of the mixed material composition for process-reliable PMA concepts was carried out.

Through research, suitable materials from previous research and construction measures were identified and procured for the investigations. The binders were characterized in terms of their physical-rheological characteristics. To characterize the aggregate and the filler, the particle size distributions and the bulk densities were determined. For the aggregates 0.063 to 2 mm, the flow coefficient ECS was also determined. Furthermore, the stiffening properties of the filler and the void content according to Rigden were tested. Extensive investigations of the influence parameters on the mortar rigidity should formulate a potential new parameter for the assessment of mortar sedimentation. In addition, a test specimen relevant to the evaluation was tested by modifying the production process of modified MPK₂₀ and asphalt test slabs determined in the roller compactor.

The laboratory tests were validated in the second phase of the project by a construction accompanying measure. For this purpose, mixed material was taken from the installation of a practical section and a documentation of the installation conditions was made. The incorporated asphalt mix was then compared with the results of the initial test.

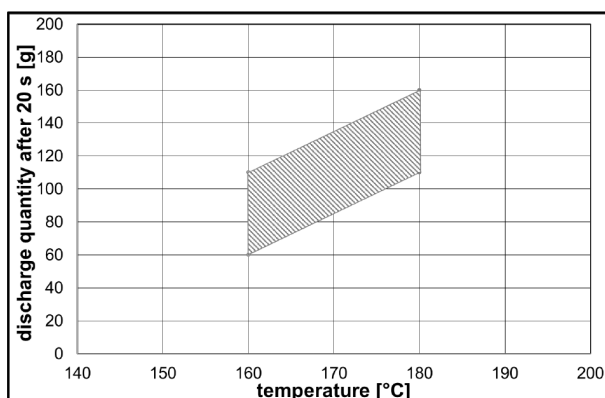


Fig. 3: Recommended range for optimal mortar rigidity

In a final step of the second project phase, the results from the installation monitoring and the control test for the optimization of the testing system were adapted on the basis of practical experience.

4 Summary and outlook

In summary, it can be stated that the development of a test system for process-reliable production and addressing of the PMA mixture in the laboratory is basically possible.

Through targeted examination of the mortar component, a parameter of the mortar stiffness was analyzed, which provides information on the expected sedimentation and the self-compacting effect. The parameter for this is the outflow rate after 20 seconds, which is to be determined in an outflow viscometer at a test temperature of 160 °C and 180 °C.

When measuring by means of an outflow viscometer, various influencing factors on the viscosity of the mortar could be identified. It can be determined that the largest grain affects the stiffening property of the filler and in turn the ratio of filler to sand in the mortar mixture influences the flow time. During the analysis of the binder component also differences in the measurement could be found. Thus, significantly higher outflow times were found in the testing of polymer-modified binders.

The measurement in the outflow viscometer measures the pure outflow from a sleeve. In practice, sedimentation is hampered by a soil skeleton. In this case, the polymers in the binder ensure good linkage and consequently affect the sedimentation of the mortar phase.

It has been shown that there is good flowability of the mortar component when, after 20 seconds, a sample amount has flown out within the recommended range (Figure 3).

Extensive testing of Marshall specimens has shown that they can only be used to optimize the mix composition by visual assessment of the two phases of the PMA using vertical cross-sectional images of the modified MPK₂₀.

An important finding, which was gained in the course of testing the mortar stiffness and the sedimentation of the mortar phase, aims at the use of po-

lymer-modified binders. Polymer-modified binders, even those with additional viscosity-modifying additives, prevent the material-typical two-phase layer structure due to the comparatively high viscosity. The expression of the two phases using PmB could only be achieved by a high (too high) binder volume.

Drilling cores taken from asphalt test slabs turned out to be suitable specimens for evaluation. For this purpose, a production process was developed, which makes it possible to ensure a homogeneous characteristic of the two phases of the PMA over the entire surface of the specimen. In order to ensure process-reliable sample production in the roller compactor, sample preparation was adjusted in a first step.

For each asphalt test slab four subsets were prepared and filled in each case a quarter area of the compression mold of the roller compactor. The recommended production process is summarized in the following table (Table 1).

The asphalt test slabs produced by this process gave good results with regard to a homogeneous cavity distribution over the length and width of the test slabs, which was validated in the course of the investigations by means of vertical slices through the asphalt test slabs and shown exemplary in Figure 4.

Also considering the space density of several drilling cores taken from the test panels provided sufficiently uniform results.

With regard to the compaction work of the roller compactor to be applied, several approaches have been followed. Both single-phase compaction, which currently state-of-the-art according to [AP PMA, 2015] is, and a two-phase compaction adapted to practice should be considered. It could be stated that the single-phase compaction proved to be suitable. Optimization of the production process has been performed in terms of force increase, where high initial load compaction has been found to be optimal in achieving uniform texture and void distribution. The load increase per rolling pass (RP) was incorporated into the process of the roller compactor according to the Table 2.

In a further investigation step, the influence of the temporary filling during the asphalt test slab production in the roller compactor was considered. For this

Procedure step	Procedure
1	Weighing of the components for the bituminous mixture in four partial quantities
2	Drying of the aggregate to constant mass and thermoregulation of the binder for the preparation of the mix
3	Production of the four partial quantities with subsequent storage in a drying oven at a temperature of 180 ° C.
4	Removal of the sample quantities
5	Short manual homogenization of the samples
6	Filling the roller compactor

Tab. 1: Adapted production process for PMA mix

Compaction procedure	initial emphasized, single-phase compaction
Sector procedure	0,2 kN
Smoothing of surface	3 RP with each 0,20 kN
Increase of force RP 1	2 RP with each 0,55 kN
Increase of force RP 2	2 RP with each 0,37 kN
Increase of force RP 3	2 RP with each 0,25 kN
Increase of force RP 4	2 RP with each 0,15 kN
Sum of force or smoothing	2,64 kN

Tab. 2: Increase in load of the initial, single-phase compaction for sample plate production

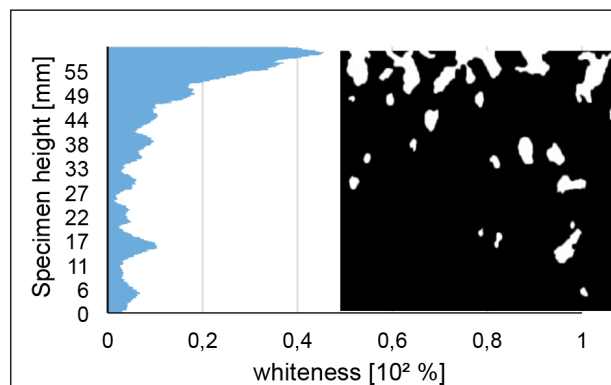


Fig. 4: Cavity distribution on the cross section of an asphalt test slab

purpose, bituminous mixture was taken from a PMA construction project from practice and produced

using various temporary fillings in accordance with [AP PMA, 2015].

In this context, it is noted that that mortar accumulations on the surface could not be detected neither during the construction project nor using a thin silicone paper. The use of the thin silicone paper is recommended for the production of practice-equivalent, homogeneous laboratory samples.

To determine the relevant test method, two dynamic test methods were investigated in addition to the determination of the static stamp penetration depth on modified MPK₂₀ and drilling cores. An adaptation of both methods for the targeted investigation of the PMA was necessary. The wheel tracking test was performed deviating from the test specification [TP Asphalt-StB, Part 22] at a test temperature of 50 °C. The results of this study were found to be usefully differentiating. To investigate the dynamic stamp penetration depth, the drilling cores of Ø 150 mm were clamped in a stainless steel cylinder and then tested on the porous side. This study also provided good differentiability.

Furthermore, it could be stated that with a targeted optimization of the PMA mixture to the basic idea of the 2-phase structure, a good homogeneity of the test specimens could be ensured by the defined production process of the asphalt test slabs. The determination of the void content and the space density fulfilled the requirements for the precision of [TP Asphalt-StB, Part 6]. This was confirmed in the investigated variants for deformation resistance (three grading curves with five different binders) and the seven variants for the validation of the testing system.

Taking into account the experience gained during the installation and the findings of this research, it should be noted that the results determined in the laboratory are only conditionally transferable to practice.

Mortar concepts were used for the recent construction work with PMA, which positively influence the structural performance in situ and should counteract demixing on the truck (mortar with PmB or fibrous materials). This meant that often no two-phase layer structure, but a random cavity distribution was created. However, the surface textures of such layers were homogeneous and still acoustically effective. Such mix concepts can not be described with the current AP PMA and therefore were not part of

the research project. The high importance of sound engineering effective construction methods should give reason to think about a reorientation of the PMA construction (demixing-resistant with as even as possible cavity distribution).

The mortar viscosity necessary for the formation of the two-phase layer structure leads to the fact that a mortar sedimentation prior to the incorporation of the mixed material can not be excluded under typical constructional boundary conditions. This can only be ruled out with mortar viscosities of higher viscosity, which in turn does not allow a uniform two-phase layer structure. If subsequent homogenisation takes place at the construction site before the mixed material is fed into the paving screed (feeder with mixing unit), the necessary uniformity of the two-phase layer structures could also be achieved during the practical implementation.

In further investigations, therefore, the necessary installation boundary conditions should be determined, with which over the area uniform two-phase cavity structure is achieved.

Literature

- AP PMA, 2015: Arbeitspapier für die Ausführung von Asphaltdeckschichten aus PMA, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV); Köln, Ausgabe 2015
- BECKENBAUER, 2008: Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Geräuschenstehung, Wirkmechanismen und akustische Wirkung unter dem Einfluss von Bautechnik und Straßenbetrieb.4 Informationstage Geräuschkindernde Fahrbahnen in der Praxis – Lärmaktionsplanung 11, 12.06.2008
- DIN EN 13108, Teil 6:Asphaltnischgut – Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt; Fassung 2013, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- EHLERT, 2013: PMA - Offenporiger Gussasphalt; Aktuelle Erfahrungen und Entwicklungen bei Straßen.NRW; Asphalt 07/2013; Giesel Verlag GmbH, Hannover, 2013
- M TA, 2011: Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV), Köln, Ausgabe 2011

TP Asphalt-StB, Teil 6: Raumdichte von
Asphalt-Probekörpern; Forschungsgesell-
schaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Köln, Ausgabe 2016

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	13
2	Zielsetzung	13
3	Theoretische Grundlagen und Stand der Erkenntnisse	13
3.1	Porous Mastic Asphalt	13
3.2	Mörtel im Asphalt	16
3.2.1	Grundlagen.	16
3.2.2	Ausflussviskosimeter	17
4	Untersuchungsmaterialien	18
5	Beschreibung des Untersuchungsprogramms	20
5.1	Untersuchungsprogramm.	20
5.2	Randbedingungen der Prüfungen	21
5.2.1	Untersuchung der Mörtelviskosität. . . .	21
5.2.2	Untersuchungen an modifizierten Marshall-Probekörpern.	21
5.2.3	Optimierung der Probeplattenherstellung im Walzsektor-Verdichtungsgerät	23
5.2.4	Prüfverfahren zur Ermittlung des Verformungswiderstandes	24
5.3	Konzeption einer Prüfsystematik für PMA und Validierung anhand von Laborproben.	25
5.4	Validierung der Prüfsystematik anhand einer Baumaßnahme.	25
6	Ergebnisse und Auswertung	26
6.1	Gemischkomponenten	26
6.1.1	Füller	26
6.1.2	Feine Gesteinskörnung	27
6.1.3	Grobe Gesteinskörnung	28
6.1.4	Bindemittel	28
6.2	Mörtelsteifigkeit	28
6.2.1	Variation des Bindemittels	28
6.2.2	Variation des Bindemittelvolumens. . . .	28
6.2.3	Variation der Gesteinskörnung	32
6.3	Untersuchungen an mod. MPK	33
6.4	Zwischenfazit zur Beurteilung der Mörtelsedimentation unter Berücksichtigung praxisrelevanter Aspekte . . .	37
6.5	Optimierung der Probeplattenherstellung	37
6.5.1	Probenvorbereitung	37
6.5.2	Variation der Verdichtung	38
6.5.3	Einfluss von Trenneinlagen	42
6.6	Verformungswiderstand und Veränderung der Oberflächentextur.	44
6.6.1	Voruntersuchungen zur Auswahl geeigneter Prüfverfahren für PMA	44
6.6.2	Hauptuntersuchungen	46
6.7	Formulierung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt anhand der Ergebnisse aus Projektphase 1	49
6.7.1	Probekörperherstellung	49
6.7.2	Mörtelkennwerte.	50
6.7.3	Bestimmung des Verformungswiderstands an repräsentativen Probekörpern.	51
6.8	Validierung der Prüfsystematik.	51
6.8.1	Validierung anhand von zwei gemäß der Prüfsystematik optimaler Varianten	52
6.8.2	Validierung durch Vergleich der Praxis- und Laborproben	54
7	Versuchsstrecke	56
8	Zusammenfassung und Ausblick . . .	58
	Literatur	59
	Bilder	62
	Tabellen	63

1 Einleitung und Problemstellung

Durch die EU-Umgebungslärmrichtlinie, welche 2005 im deutschen Bundes-Immissionsschutzgesetz [BImSchG] verpflichtend umgesetzt wurde, kommt lärmindernden Bauweisen eine zunehmende Bedeutung zu. Neben dem offenporigen Asphalt (Porous Asphalt, PA), welcher seine Lärmreduzierung durch eine Absorption von Schall, infolge der Verringerung aerodynamischer Vorgänge erzielt, wurden erstmals im Jahr 2008 Asphaltstraßen mit einer Asphaltdeckschicht aus Porous Mastic Asphalt (PMA) gebaut. Solche Asphaltkonzepte mit dichter Zusammensetzung erzielen ihre lärmindernde Eigenschaft über die Beschaffenheit der Oberflächenstruktur. [BECKENBAUER, 2008]

Während offenporige lärmindernde Bauweisen wie PA nur mit mittleren Nutzungsdauern von acht bis zehn Jahren angegeben werden, lässt der Porous Mastic Asphalt durch seine überwiegend dichte Struktur neben seinen lärmtechnischen Vorzügen auch eine längere Nutzungsdauer erwarten.

Für PMA liegt zum Zeitpunkt der Berichtsverfassung keine Pflicht zur CE-Kennzeichnung vor, da dieser sich nicht mit der [DIN EN 13108, Teil 6] beschreiben lässt. Empfehlungen zum Einsatz und zur Konzeption von PMAAsphaltmischgut werden im Arbeitspapier für die Ausführung von Asphaltdeckschichten aus PMA [AP PMA, 2015] gegeben.

Neben den im [AP PMA, 2015] festgelegten Richtwerten für Asphaltmischgut PMA 8 und PMA 5 existieren gesonderte Anforderungen und Empfehlungen an die einzusetzenden Baustoffe, mit denen die Prozesssicherheit der baupraktischen Umsetzung verbessert werden sollen.

Der PMA erhält seine typische Schichtstruktur durch das Absinkverhalten des Asphaltmörtels innerhalb des grobkörnigen Korngerüsts. Er gilt durch seinen bindemittelreichen Mörtel, in Kombination mit dem Einsatz viskositätsverändernder Bindemittel, gemäß dem Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt [M TA, 2011], als weitgehend selbstverdichtend.

Hinsichtlich des theoretischen Grundgedankens des selbstverdichtenden Asphaltkonzeptes PMA existieren jedoch unterschiedliche Erfahrungen, diese Wirkungsweise im labortechnischen Maßstab

wie auch beim Einbau auf der Baustelle prozesssicher abzubilden.

Dies zeigt sich primär durch den schlecht steuerbaren Vorgang des Absinkens der Mörtelphase. Es kommt im Labor wie auch in der Praxis zu vereinzelt Fehlstellen durch Mörtelanreicherungen an der Oberfläche. Beim Einbau konnte zudem festgestellt werden, dass das PMAMischgut besonders sensibel gegenüber einbauspezifischen Parametern, wie Einbautemperatur, Einbaugeschwindigkeit, Stillstand des Fertigers und Einbautechnik ist.

Diese Erkenntnisse führen zu der Notwendigkeit, den PMA hinsichtlich der Prozesssicherheit bestmöglich zu optimieren.

2 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist die nachhaltige und wirtschaftliche Optimierung der Bauweise PMA anhand der prozesssicheren Ansprache der besonderen Materialeigenschaften.

Dieses Gesamtziel soll durch die Entwicklung oder Anpassung einer Prüfsystematik erreicht werden, mit der eine zielsichere Mischgutoptimierung erreicht wird.

Die temperaturabhängige Mörtelsteifigkeit wird hierbei besonders betrachtet, um den Effekt der Mörtel-sedimentation beim Einbau hinreichend prozesssicher zu erreichen.

Dazu werden die Komponenten Bindemittel, Füller und feine Gesteinskörnung vorrangig auf die selbstverdichtenden Eigenschaften von PMA untersucht.

Die so entwickelte Prüfsystematik soll anschließend anhand von Rückstellproben und einer projektbegleitenden Baumaßnahme validiert werden.

3 Theoretische Grundlagen und Stand der Erkenntnisse

3.1 Porous Mastic Asphalt

Die Bauweise Porous Mastic Asphalt, auch als Gussasphalt (MA) mit offenporiger Struktur bezeichnet, wurde Ende 2008 erstmalig eingebaut [JANNICKE, 2009].

Für den Einsatz von PMA wurden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten erprobt. Im Vordergrund stand dabei die Minderung des Verkehrslärms durch Reifen/Fahrbahn-Geräusche.

Diese Bauweise ist damit eine wirkungsvolle Möglichkeit, der Entstehung des Straßenverkehrslärms direkt an der Quelle entgegenzuwirken [EHLERT, 2013]. Das Deckschichtkonzept ist eine Abwandlung eines klassischen Gussasphaltes und verbindet die lärmindernden Eigenschaften eines offenen Asphalts mit den Eigenschaften der langen Nutzungsdauer eines Gussasphaltes [JANNICKE, 2010].

Der PMA setzt sich aus einer 2-Phasen-Struktur, wie in Bild 1 dargestellt, zusammen. Die untere Zone der fertigen Schicht entspricht einem klassischen hohlraumarmen Gussasphalt. Der obere Bereich (ca. 1/3 der Einbaudicke) weist einen großen Anteil an Hohlräumen auf.

Damit das Grundprinzip der 2-Phasen-Struktur funktionieren kann, muss sich ein niedrigviskoser, bindemittelreicher Mörtel während des Einbauvorgangs in den Hohlräumen des Korngerüsts der groben Gesteinskörnungen gleichmäßig absetzen. Im oberen Bereich des PMA entsteht durch die Sedimentation eine hohlraumreiche Struktur mit bis zu 20 Vol.% Hohlraumgehalt.

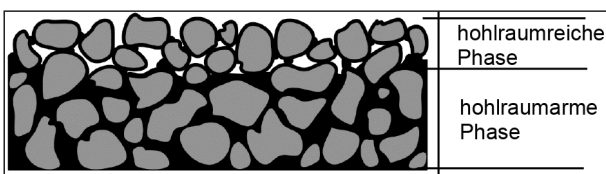


Bild 1: Prinzipskizze PMA in Anlehnung an [EHLERT, 2013]

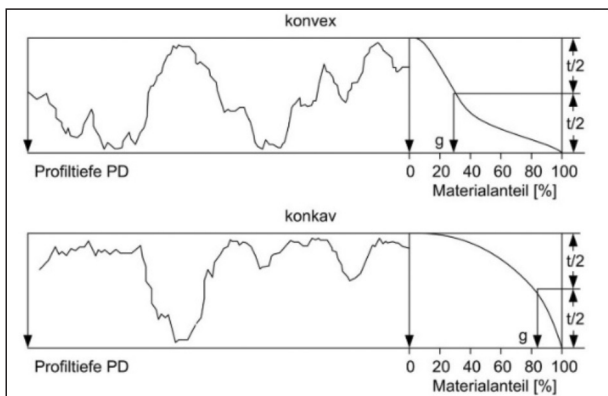


Bild 2: Ermittlung des Gestaltfaktors g aus dem Materialanteil nach [BECKENBAUER ET. AL., 2002]

Die Textur der Oberfläche eines PMA zeichnet sich durch ein System aus Plateaus mit Schluchten mit einer mittleren Rautiefe > 1 mm aus, welches maß-

Bezeichnung	Einheit	PMA 8	PMA 5
Baustoffe			
Gesteinskörnungen (Lieferkörnung)			
Anteil gebrochener Kornoberfläche		$C_{100/0}; C_{95/1}; C_{90/1}$	$C_{100/0}; C_{95/1}; C_{90/1}$
Widerstand gegen Zertrümmerung		SZ ₁₈ / LA ₂₀	SZ ₁₈ / LA ₂₀
Widerstand gegen Polieren		PSV _{angegeben} (51)	PSV _{angegeben} (51)
Kornform- / Plattigkeitskennzahl		SI ₁₅ / FI ₁₅	FI ₁₅
Fließkoeffizient E _{CS}		EC _{Sangegeben}	EC _{Sangegeben} ⁿ
Bindemittel, Art und Sorte ¹⁾		30/45 25/55-55 A	30/45 25/55-55 A
Zusammensetzung Asphaltmischgut			
Gesteinskörnungsgemisch			
11,2 mm	M.-%	100	
8 mm	M.-%	90 bis 100	100
5,6 mm	M.-%		90 bis 100
2 mm	M.-%	30 bis 40	25 bis 40
1 mm	M.-%	30 bis 40	25 bis 40
0,063 mm	M.-%	16 bis 20	16 bis 20
Mindest-Bindemittelgehalt	M.-%	6,7	6,9
Asphaltmischgut			
Hohlraumgehalt am mod. MPK ₂₀ ²⁾	Vol.-%	ist anzugeben	ist anzugeben
Hohlraumgehalt an Probekörpern aus einer Asphaltprobeplatte ³⁾	Vol.-%	ist anzugeben	ist anzugeben
Statische Eindringtiefe am mod. MPK ₂₀ ²⁾	mm	ist anzugeben	ist anzugeben
proportionale Spurrinntiefe ⁴⁾	%	ist anzugeben	ist anzugeben
mittlere Texturtiefe MTD oder geschätzte Texturtiefe ETD	mm	ist anzugeben	ist anzugeben

Tab. 1: Richtwerte für PMA-Asphaltmischgut [AP PMA, 2015]

gebend zu den lärmoptimierten Eigenschaften des Asphalts beiträgt. Die Beurteilung der Textur erfolgt u. a. anhand des Gestaltfaktors. Der Gestaltfaktor g stellt das Maß für die unterschiedliche Texturgestalt dar und wird aus der Materialanteilkurve des Profils, auch Abbott-Kurve genannt, bestimmt. Die Materialanteilkurve stellt nach [DIN EN ISO 4287] den Materialanteil des Profils als Funktion der Schnitthöhe dar und entspricht somit der Summenhäufigkeitskurve der Ordinatenwerte $Z(x)$. Der Gestaltfaktor g gibt den Materialanteil in Prozent bei halber Profiltiefe an (Bild 2). PMA wirkt ausschließlich über die Textur. Schallabsorbierende Eigenschaften konnten bisher, zumindest in dem für das menschliche Gehör relevanten Frequenzbereich nicht festgestellt werden [BECKENBAUER ET. AL., 2002].

Der Asphaltbauweise PMA kann schalltechnisch noch kein Korrekturwert D_{StrO} nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen [RLS 90, Ausgabe 1990] zugeordnet werden. Die lärmindernde Wirkung konnte jedoch nachweislich anhand der Close-Proximity-Methode (CPX) [ISO/CD 3rd 11819-2] und von Statischer Vorbeifahrpegel-Messungen (SPB) dokumentiert werden [JANNICKE, 2009].

Um die akustischen Eigenschaften eines PMA hinreichend zielsicher zu erreichen sind weitere Kenntnisse über die verschiedenen Einflüsse der Komponenten auf das Absinken des Mörtels zu gewinnen [EHLERT, 2013 und 2014].

Gemäß [AP PMA, 2015] werden Richtwerte für die Mischgutkomponenten definiert, die in Tabelle 1 dargestellt sind und einen ersten Anhalt über eine funktionale Mischgutzusammensetzung geben.

Eine Asphaltdeckschicht aus PMA kann mit einem Größtkorn von 8 mm (PMA 8) oder 5 mm (PMA 5) hergestellt werden [AP PMA, 2015]. Praxiserkennt-



Bild 3: Mörtelanreicherungen an der Oberfläche [EHLERT, 2013]

nisse liegen jedoch fast ausschließlich mit dem PMA 5 vor.

Anforderungen an Bindemittel und Gestein sind dabei gemäß den [TL Asphalt-StB 07/13] definiert. Der Umfang der Laborprüfungen entspricht dem eines Asphaltmischgutes für Gussasphalt mit Änderungen und Ergänzungen gemäß [AP PMA, 2015]. Die Laborentwicklungsphase im Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr, Teil 3 [LeiStra 3, 2011] hat gezeigt, dass die Prüfung des klassischen Marshall-Probekörpers (MPK) keine zielführenden Ergebnisse liefert. Der modifizierte MPK mit 20 Schlägen und Lagerung auf der geschlagenen Seite wurde für die Untersuchungen im Rahmen von Erstprüfungen als vorläufige Hilfsgröße etabliert.

Nach aktuellem Stand der Technik ist die Herstellung eines Probefeldes zurzeit noch erforderlich, um die Einbaubedingungen festlegen zu können.

Der Einbau des PMA erfolgt anders als beim Gussasphalt durch einen Straßenfertiger mit Belieferung durch Lkw-Mulden. Eine Verdichtung erfolgt dabei über die Tamper, welche mit minimaler Umdrehung laufen. Eine zusätzliche Verdichtung wird aufgrund der selbstverdichtenden Eigenschaften als nicht notwendig angesehen. Walzen sollen lediglich die Gesteinskörner an der Oberfläche flach ausrichten und erzeugen damit die lärmtechnisch günstige Oberflächentextur. Der Walzvorgang erfolgt dabei bei einer Oberflächentemperatur $< 130\text{ °C}$, sodass ein zusätzlicher Verdichtungseffekt nicht ausgeschlossen werden kann. Ein Einbau unter Zuhilfenahme eines Beschickers hat sich bei Einbaugeschwindigkeiten von 2,0 m/min bis 5,0 m/min bewährt. Die empfohlene Einbautemperatur wird mit 180 °C angegeben. Eine weitere Vorgabe ist durch eine maximale Transportzeit von 45 Minuten gegeben. Bei einer falsch eingestellten Temperatur oder zu langen Transportzeiten kann es zu einer Entmischung während des Mischguttransports kommen. Die Entmischung des Mörtels beim Transport könnte nach [EHLERT, 2013] die Ursache für Mörtelanreicherungen an der Oberflächentextur sein.

Das Bild 3 zeigt ein solches Schadensbild für PMA. Seit 2010 werden auch Strecken außerhalb von Nordrhein-Westfalen gebaut, um Kenntnisse über eine möglichst breite Vielfalt von Mischgutkonzeptionen, mit den jeweiligen regional-spezifischen Besonderheiten und den entsprechenden Einbaubedingungen zu sammeln.

Im Labor	In Situ
Bindemittelanreicherungen an der Oberfläche von Asphaltprobeplatten	Bindemittelanreicherungen an der Oberfläche
Ungleichmäßige Hohraumverteilung innerhalb einer Asphaltprobeplatte	Ungleichmäßige Hohraumverteilung - vertikal in der Schicht - über die Einbaubreite
Keine vergleichbaren Ergebnisse zwischen Probeplatten einer Mischgutcharge, trotz Berücksichtigung der aktuellen Empfehlungen zur PMA-Plattenherstellung in Anlehnung an das AP PMA	Ungleichmäßige Verdichtungsgrade (wobei die Bewertung des Verdichtungsgrades von PMA-Mischgut aktuell generell als kritisch zu bewerten ist)
Unterschiede zwischen Raumdichten von Asphaltprobeplatten und mod. MPK ₂₀	Offene Texturen bei zu hoher Einbaugeschwindigkeit
	Ungleichmäßigkeiten im Bereich des Kratzbandes des Fertigers
	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Stillständen/Einbauverzögerungen
	Starkes Temperaturgefälle innerhalb des Fertigerkübels/LKWs
	Begrenzte Transportzeit
	Keine Silolagerung möglich/empfehlenswert

Tab. 2: Problematiken in Bezug auf PMA

Weitere Probleme, die sich hinsichtlich der labor-technischen Prüfung und dem Asphalteinbau ergeben haben, sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

3.2 Mörtel im Asphalt

3.2.1 Grundlagen

Der Asphaltmörtel ist ein Gemisch aus bitumenhaltigem Bindemittel, Füller (Gesteinspartikel mit Durchmesser < 0,063 mm) und feiner Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von bis zu 2 mm Durchmes-

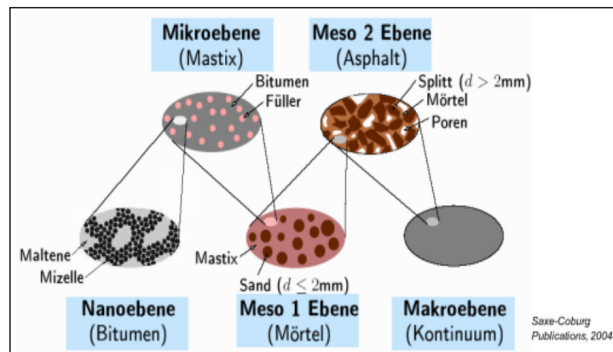


Bild 4: Mehrskalensmodell zur Abbildung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt [LACKNER, ET. AL., 2004]

ser. Die einzelnen Komponenten beeinflussen die Eigenschaften des Asphaltmörtels und damit auch die mechanischen Eigenschaften des daraus hergestellten Asphalts.

Das Gebrauchsverhalten einer Asphaltstraße kann nach [LACKNER, ET. AL., 2004] durch ein Mehrskalensmodell anhand einer hierarchischen Struktur aus verschiedenen Ebenen dargestellt werden. Dieses Mehrskalensmodell ist in Bild 4 dargestellt. Das Materialverhalten der Asphaltenebene wird dabei von der nächsttieferen Asphaltmörtelenebene und diese wiederum von der darunterliegenden Mastixebene bestimmt.

Bei der Herstellung von Asphalt lagert sich die Einzelkomponente Bitumen an das Gestein an und umschließt die Gesteinspartikel. Die entstehende Mörtel- oder Mastixphase erfüllt dabei im Asphalt unterschiedliche Funktionen. Im Bereich der Asphaltstraßen wird eine Differenzierung in Walzasphalthe und Gussasphalthe vorgenommen. Der Asphaltmörtel sorgt im Walzasphalt für eine stabilisierende Wirkung. Die einzelnen Gesteinskörner werden an ihren Kontaktpunkten durch den Mörtel verklebt, dieser sorgt dafür, dass die einwirkenden Kräfte über die Kontaktpunkte schadlos abgetragen werden können.

Im Gussasphalt werden die Gesteinskörner vollständig im Asphaltmörtel eingebettet. Die Gesteinskörner mit einem Durchmesser > 2 mm sorgen in diesem Zusammenhang für eine Versteifung der Mörtelphase.

Bei Asphaltdeckschichten aus PMA ist die Mörtelphase von besonderer Bedeutung. Damit das gleichmäßige Absetzen des Mörtels beim Einbau erreicht werden kann, darf er weder zu hochviskos noch zu niedrigviskos eingestellt sein. Eine hochvis-

kose Mörtelphase würde zu einem steifen Materialverhalten führen und das Absetzen des Mörtels verhindern. Stellt sich die Mörtelviskosität dagegen zu niedrigviskos ein, würde es zu einem sehr schnellen Absetzen des Mörtels schon während der Anlieferung durch Entmischung auf dem Lkw kommen [EHLERT, 2013].

Um eine optimale Mörtelphase zu erreichen, müssen die verschiedenen Einflüsse bei der Mischgutkonzeption berücksichtigt werden. Es fehlen jedoch Untersuchungen, um die Mörtelkombination zu identifizieren, welche die optimierten Eigenschaften besitzt. Einige einfache und wirtschaftliche Prüfverfahren, mit denen Asphaltmörtelkombinationen angesprochen werden können, gibt es bereits. Erste Untersuchungen von Asphaltmörteln wurden durch [NAUEN, 2014] und [PLAKSJUK, 2014] an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die Versuche wurden mit dem für die entsprechende Versuchsdurchführung modifizierten Prüfgerät „Straßen-Teer-Viskosimeter“, nachfolgend auch als Ausflussviskosimeter bezeichnet, in Anlehnung an [DIN 52023] durchgeführt.

Mit weitergehenden Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass nicht nur die Bindemittelart/-sorte das Fließverhalten des Mörtels beeinflusst, sondern auch die Provenienz des Füllers. Zudem stellte sich heraus, dass die Ausflussmenge des Mörtels mit steigendem Fülleranteil bei gleichbleibender Ausflusszeit deutlich abnimmt. Dies ist auf die versteifende Eigenschaft des Füllers zurückzuführen [ROOT, 2013].

3.2.2 Ausflussviskosimeter

Das Ausflussviskosimeter ist ein Prüfgerät, zur Bestimmung der Ausflusszeit einer viskosen Masse. Die Untersuchungen erfolgen dabei gemäß [DIN EN 12846-1].

Es geht in seiner Entwicklung auf das Straßenpech-Ausflussgerät zurück, welches zur Bestimmung der Ausflusszeit von Straßenpechen, Fluxbitumen, Pechbitumen, Bitumenpechen, Kaltpechlösungen, Kaltbitumen, Bitumenemulsionen, Pchemulsionen und ähnlichen Stoffen diente. Die Untersuchungen im Straßenpech-Ausflussgerät erfolgen dabei gemäß [DIN 52023].

Für die Untersuchungen an Bitumenmörtel ist jedoch eine Anpassung der Prüfbedingungen nötig.

Für bitumenhaltige oder teer-pechhaltige Bindemittel ohne Gesteinskörnungen wird die Ausflusszeit einer 50-g-Probe bei einer festgelegten Temperatur durch eine Auslauföffnung von 10 mm, 4 mm oder 2 mm ermittelt. Der Temperaturbereich ist dabei auf 40 °C festgelegt, kann allerdings bei Bedarf angepasst werden. Es werden alle Versuche bei der gleichen Temperatur durchgeführt. Dabei wird gemessen, wie viel Zeit benötigt wird bis 50 g ausgelaufen sind. Die Messung wird bei 25 g gestartet und bei 75 g gestoppt. Die Messung ist mit einer Stoppuhr, welche auf mindestens 0,2 s genau misst, durchzuführen.

Erste Untersuchungen im Zuge von Forschungstätigkeiten an der Ruhr Uni Bochum wurden an Asphaltmörtel für PMA vorgenommen und mit einer Verfahrensbeschreibung für die Versuchsausführung dokumentiert.

Dabei wurde die Ausflussmenge eines Mörtels in einem festgelegten Zeitraum gemessen. Die Versuche wurden bei einer Mörteltemperatur von 170 °C durchgeführt. Die verwendeten Hülsen wurden vortemperiert, um einer Abkühlung des Mörtels entgegen zu wirken. Nachdem der Mörtel eingefüllt war, wurde die Hülse geöffnet und der ausfließende Mörtel aufgefangen. Nach 20 s wurde die Hülse geschlossen und der ausgelaufene Mörtel gewogen. Durch die Verwendung verschiedener Füller/Mörtelkombinationen können Aussagen über die rheologischen Eigenschaften getroffen werden.

Das Ausfluss-Viskosimeter ist mit seinem Versuchsaufbau in Bild 5 dargestellt.

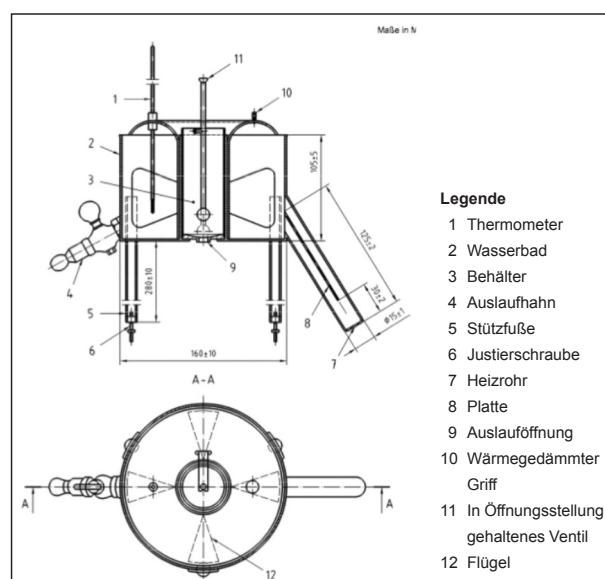


Bild 5: Schnittansicht und Draufsicht eines Straßen-Teer-Viskosimeters nach [DIN EN 12846-1]

Das verwendete Ausflussviskosimeter ist, wie in Bild 6 dokumentiert, zusätzlich mit einer Rührvorrichtung durch einen Elektromotor ausgestattet worden.

Grundsätzlich bieten sich für die Messungen mit diesem Gerät zwei Auswertemöglichkeiten an. Die erste Möglichkeit ist die Erfassung der Ausflusszeit, eine zweite Möglichkeit ist die Messung eines Volumens oder einer Masse.

Bewährt hat sich die Erfassung der Zeit in der 50 g ausfließen. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu

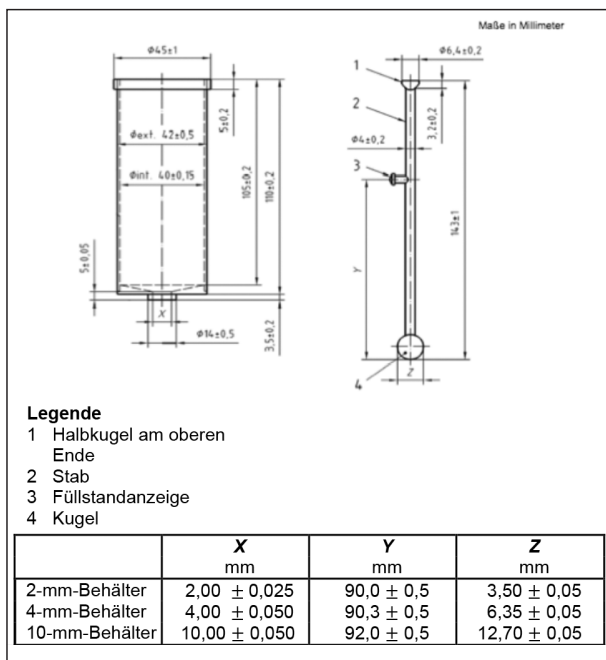


Bild 6: Viskosimeterhülse und Kugelventil [DIN EN 12846-1]



Bild 7: Versuchsaufbau im Labor der Ruhr Universität Bochum

erhöhen, werden die Messungen mit einer computergesteuerten Wägezelle durchgeführt. Diese ist in der Lage, das Gewicht kontinuierlich zu erfassen und in 5-Hz-Schritten als Excel-Datei auszugeben. Damit können beide Untersuchungsmethoden gleichzeitig durchgeführt werden.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 7 dargestellt.

4 Untersuchungsmaterialien

In dieser Forschungsarbeit erfolgt die Materialauswahl aus Referenzprojekten und Voruntersuchungen, welche im Rahmen von Forschungstätigkeiten und studentischen Arbeiten an der Ruhr-Universität Bochum entstanden sind [RADENBERG, ET. AL., 2012], [NAUEN, 2014] und [PLAKSJUK, 2014].

Ein besonderer Stellenwert bei der Materialauswahl kommt der Praxisrelevanz der einzusetzenden Gesteine zu. Dabei wurde eine repräsentative Auswahl an Gesteinseigenschaften angestrebt.

Hinsichtlich des Einflusses des Bindemittels wurden in [RADENBERG, ET. AL., 2012] und [NAUEN, 2014] mit 40 verschiedenen Straßenbaubitumen, gebrauchsfertige modifizierte Bitumen und eigenständig modifizierte Bitumen Erfahrungen bei der Optimierung von PMA-Mischgutkonzepten gesammelt.

In Abstimmung der aus [RADENBERG, ET. AL., 2012] und [NAUEN, 2014] ermittelten Ergebnisse, abgestimmt mit gewonnenen Erfahrungen aus begleiteten Baumaßnahmen, wurden die nachfolgenden vier Grundbindemittel für die Untersuchungen ausgewählt:

- 30/45
- 50/70
- 10/40–65 A
- 25/55–55 A

Es wurden Fertigbindemittel mit den viskositätsverändernden Zusätzen Fettsäureamid (Amidwachs) und Fischer-Tropsch-Wachs (FT-Wachs) untersucht. Zusätzlich wurde ein weiteres Bitumen berücksichtigt, welches sich im Praxiseinsatz als geeignet erwiesen hat.

Eine Auflistung der verwendeten Bitumen ist in Tabelle 3 dargestellt. In der nachfolgenden Bearbeitung werden die Bindemittel mit den in der Tabelle 3 hinterlegten Bezeichnungen B1 bis B9 bezeichnet.

Neben dem Bindemittel haben das Füller/Sand-Verhältnis sowie die Art des Füllers und des Sandes einen Einfluss auf die Viskosität der Mörtelphase im Verarbeitungstemperaturbereich.

In [PLAKSJUK, 2014] wurden verschiedene Füller hinsichtlich ihres Einflusses auf die Mörtel- und Mastixviskosität untersucht. Basierend auf positiven Erfahrungen im PMA wurden zunächst zwei Füller ausgewählt.

- Kalksteinfüller (Mahlfeinheit 5/74)
- Kalksteinfüller (Mahlfeinheit 5/90)

Die verwendeten Kalksteinfüller stammen aus der selben Gewinnungsstätte. Die Füller sind dabei anhand der Korngrößenverteilung, der Rohdichte, den versteifenden Eigenschaften sowie dem Hohlraumgehalt nach Ridgen zu differenzieren.

In Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Betreuungsausschuss wurde festgelegt, dass ein breiteres Spektrum der Kalksteinfüller durch zwei weitere Füller abgedeckt werden soll. Diese sollen hinsichtlich ihrer versteifenden Eigenschaft, beurteilt anhand der Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel (ΔRuK) gemäß [DIN EN 13179-1], eine möglichst große Spannweite aufweisen.

Die Quellen der verwendeten Füller werden in Tabelle 4 aufgeführt und im nachfolgenden Text mit den Bezeichnungen, gemäß Spalte 1 der Tabelle 4, als KS1 bis KS4 abgekürzt.

Die Auswahl der groben Gesteinskörnung > 2 mm beschränkt sich auf zwei Gesteinsarten, mit welchen ebenfalls positive Erfahrungen im Rahmen des Forschungsprojektes FE 07.0239/2010/AGB [RADENBERG, ET. AL., 2012] sowie beim Einbau von Asphaltdeckschichten aus PMA gewonnen wurden. Dabei wurde die Einhaltung eines Unterkornanteils $\leq 7,0$ M.-% berücksichtigt (Tabelle 5).

Aus [RADENBERG, ET. AL., 2012] und [HOFKO, ET. AL., 2015] liegen zudem Erkenntnisse in Bezug auf den Einsatz feiner Gesteinskörnung vor. Als positiv haben sich dabei ungebrochene Gesteinskör-

nung bis 2,0 mm mit einem Fließkoeffizienten E_{CS} von weniger als 30 Sekunden und einem geringen Anteil $> 1,0$ mm gezeigt. Zur Überprüfung dieser Erkenntnisse wurden Sande aus drei verschiedenen Gewinnungsstätten betrachtet.

Die untersuchten Natursande sind in Tabelle 6 aufgezählt.

Für die Gesteinskörnungen 0,063 bis 2 mm wurden neben der Korngrößenverteilung und der Rohdichte Untersuchungen hinsichtlich des Fließkoeffizienten E_{CS} durchgeführt.

Bezeichnung	Bitumensorte	Zusatz
B1	30/45	Amidwachs
B2	25/55–55	Amidwachs
B3	10/40–65	Amidwachs
B4	50/70	FT-Wachs
B5	30/45	FT-Wachs
B6	25/55–55	FT-Wachs
B7	10/40–65	FT-Wachs
B8	50/70	Amidwachs
B9	30/45	Amidwachs

Tab. 3: Auswahl projektbezogener Bindemittel

Bez.	Füllerart	Gewinnungsstätte
KS1	Kalksteinfüller 5/74	Flandersbach
KS2	Kalksteinfüller 5/90	Flandersbach
KS3	Kalksteinfüller	Berenburg
KS4	Kalksteinfüller	Rüdersdorf

Tab. 4: Auswahl projektbezogener Füller

Gesteinsart	Gewinnungsstätte
Diabas 2/5 mm	Halbeswig
Grauwacke 2/5 mm	Listertal

Tab. 5: Auswahl projektbezogener grober Gesteinskörnung

Natur-sande	Körnung	Gewinnungsstätte
NS1	0/1 mm	Wesseling
NS2	0/1 mm	Kamp-Lintfort
NS3	0/1 mm	Kaarst
NS4	0/2 mm	Wesseling
NS5	0/2 mm	Kamp-Lintfort
NS6	0/2 mm	Kaarst

Tab. 6: Auswahl projektbezogener feiner Gesteinskörnung

5 Beschreibung des Untersuchungsprogramms

5.1 Untersuchungsprogramm

Das Forschungsprojekt lässt sich in zwei Projektphasen unterteilen, welche durch das in Bild 8 dargestellte Fließdiagramm beschrieben sind.

Die labortechnische Optimierung der Mischgutzusammensetzung für prozesssichere PMA-Konzepte

wurde im ersten Teil des Projektes durchgeführt. Mit einer Recherche wurden für die Untersuchungen geeignete Materialien aus vorhergegangenen Forschungsarbeiten und Baumaßnahmen ermittelt und beschafft. Die Bindemittel wurden hinsichtlich ihrer physikalisch-rheologischen Kennwerte charakterisiert. Zur Charakterisierung der Gesteinskörnung sowie des Füllers wurden die Korngrößenverteilungen und die Rohdichten ermittelt. Für die Gesteinskörnungen 0,063 bis 2 mm wurden darüber hinaus der Fließkoeffizient ECS bestimmt. Ferner wurden

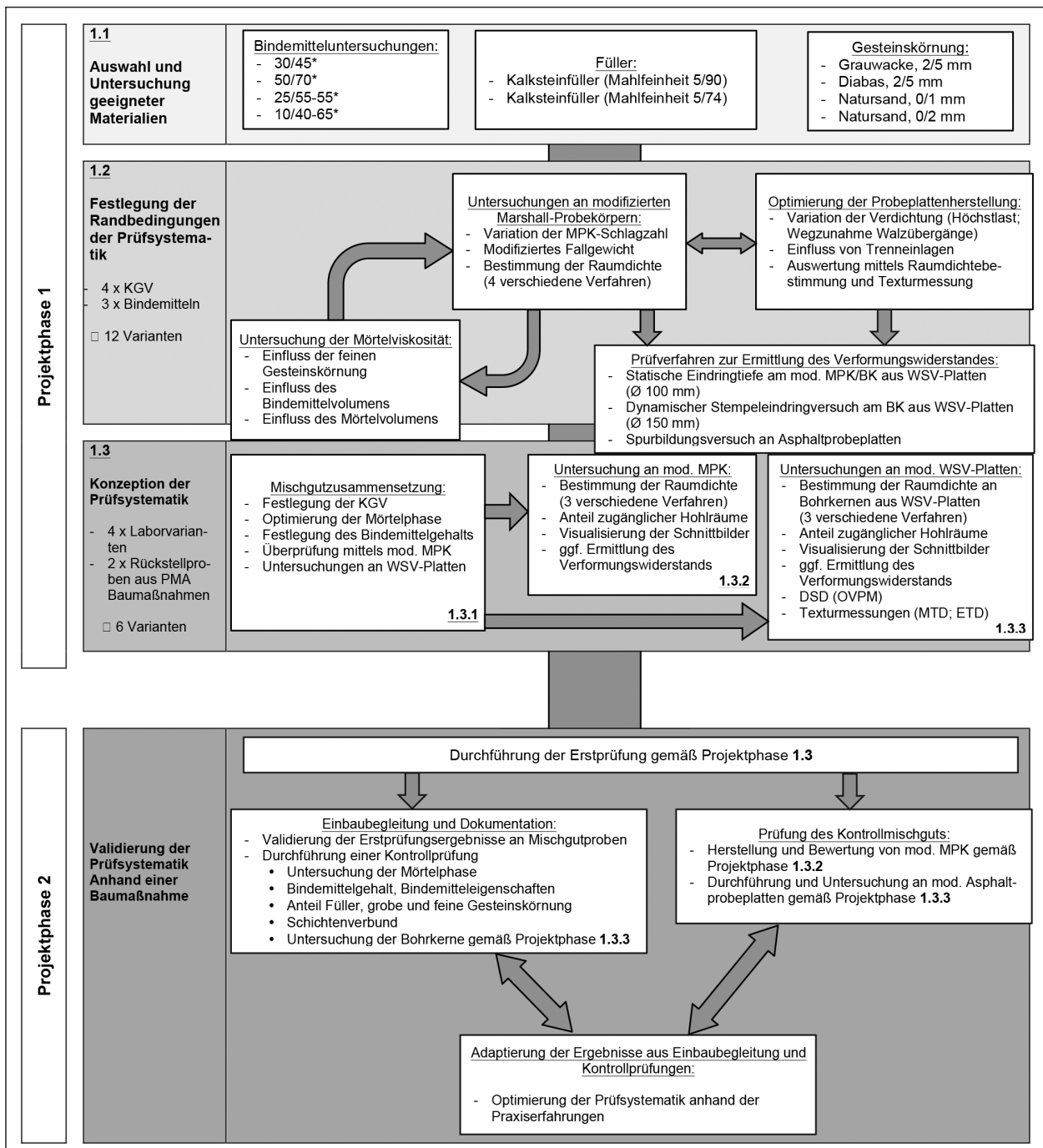


Bild 8: Flussdiagramm des Untersuchungsprogramms

die versteifenden Eigenschaften des Füllers und der Hohlraumgehalt nach Rigden überprüft.

Die labortechnischen Untersuchungen wurden in der zweiten Projektphase durch eine baubegleitende Maßnahme validiert. Dafür wurde beim Einbau einer Praxisstrecke Mischgut entnommen und eine Dokumentation der Einbaubedingungen angefertigt. Das eingebaute Asphaltmischgut wurde anschließend mit den Ergebnissen der Erstprüfung vergleichend betrachtet.

In einem letzten Schritt der zweiten Projektphase erfolgte eine Adaptierung der Ergebnisse aus der Einbaubegleitung und der Kontrollprüfung zur Optimierung der Prüfsystematik anhand der Praxiserfahrungen.

5.2 Randbedingungen der Prüfungen

5.2.1 Untersuchung der Mörtelviskosität

Für die selbstverdichtende Wirkung des PMA ist primär der Mörtel verantwortlich. Ein hochviskoser Mörtel führt zu einem steifen Materialverhalten und verhindert dessen Absetzen während des Einbauprozesses. Sehr niedrigviskose Mörtel führen wiederum zu einer zu schnellen Sedimentation.

Für die Untersuchungen der Mörtelphase wurden die rheologischen Eigenschaften mit Hilfe eines Ausflussviskosimeters in Anlehnung und Erweiterung an [DIN 52023] und [LeiStra 3, 2011] bestimmt. Es wurde die Ausflussmenge des Mörtels, bestehend aus Bindemittel, Füller und Gesteinskörnung < 2 mm, in einem Temperaturband von 140 °C bis 200 °C erfasst. Die Bestimmung der Ausflussmenge nach 20 Sekunden hat sich als quantitatives Bewertungskriterium im Bereich der Verarbeitungstemperatur von PMA erwiesen ($T = 180 \text{ °C}$). Unterschiede im Materialverhalten bei geringeren Temperaturen ($T = 140 \text{ °C}$) können über die Darstellung der Ausflusszeit zwischen 25 g und 75 g abgebildet werden.

Die Untersuchungen erfolgten dabei in einer Doppelbestimmung. Die Mörtelkomponenten wurden einzeln erhitzt und in einer Mischschüssel bei einer Temperatur $T \geq 160 \text{ °C}$ unter ständigem Rühren zu einer homogenen Masse verarbeitet, anschließend in Auffangbehälter abgefüllt und für weitere Untersuchungen präpariert.

Die abgefüllten Proben wurden zusammen mit der Mörtelausflusshülse mindestens eine Stunde auf

die Prüftemperatur erhitzt und das Ölbad im Ausflussmesser ebenfalls auf diese Temperatur eingestellt. Nach Erreichen der Temperierzeit wurde die Hülse in das Ausflussviskosimeter eingesetzt, dann die 250 g Probe in die mit einem Verschlusskugelstab verschlossene Hülse eingefüllt und das Messprogramm gestartet. Der Verschlusskugelstab war dabei unmittelbar nach dem Start des Messprogramms zu ziehen.

5.2.2 Untersuchungen an modifizierten Marshall-Probekörpern

Ein Teilziel zur Erstellung einer prozesssicheren Prüfsystematik für PMA war u. a. die Festlegung des optimalen Verfahrens zur Probekörperherstellung mit dem die zweiphasige Schichtstruktur abgebildet werden kann.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens Leiser Straßenverkehr 3 [LeiStra 3, 2011] wurde innerhalb des Teilprojektes „Anpassung von Materialtechnologien zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften von Asphaltbelägen“ von der Ingenieurgesellschaft für Zuschlag- und Baustofftechnologie (ZuB) eine Methodik zur verbesserten Abbildung der Materialeigenschaften mittels Marshall-Probekörper (MPK) entwickelt. Die Untersuchungen zeigten, dass die Herstellung von MPK mit 20 Verdichtungsschlägen (einseitig) sowie der anschließenden Lagerung des Probekörpers auf der mit den Verdichtungsschlägen beanspruchten Seite (mod. MPK_{20}) brauchbare Ergebnisse lieferten [LeiStra 3, 2011].

Der Vergleich der Hohlraumgehalte von modifizierten Marshall-Probekörpern (mod. MPK_{20}) mit Bohrkernen aus der Praxis zeigte aber, dass keine hinreichende Vergleichbarkeit vorliegt. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, dass der mod. MPK_{20} weiter angepasst werden sollte, um die Ergebnisse des Hohlraumgehaltes zwischen Labor und Praxis in Einklang zu bringen. Grundlegendes Ziel in diesem Untersuchungsschritt war es ein optimiertes Bewertungsverfahren für modifizierte Marshall-Probekörper auf Basis verschiedener Randbedingungen zu entwickeln.

Für die Untersuchungen sollten dabei zum einen die Randbedingungen des Versuchs und zum anderen die Art der Auswertung variiert werden.

Zur Analyse der Einflussfaktoren auf die veränderte Verdichtungssituation bei Asphaltdeckschichten aus PMA, sollten auf Basis des mod. MPK_{20} nach

[AP PMA, 2015] weitere Untersuchungsreihen mit einem modifizierten Marshall-Verdichtungsgerät durchgeführt werden. Zielsetzung war, das in situ vorherrschende Verdichtungsmanagement besser abbilden zu können (minimale Verdichtungsleistung der Bohle, etc.).

Die Modifikationen am handelsüblichen Marshall-Verdichtungsgerät sollte dabei einem praktikablen Ansatz folgen, um eine Nachrüstung möglichst einfach zu gestalten.

Ein Ansatz zur Reduktion der aufgebrauchten Verdichtungskraft basiert auf mathematisch-physikalischen Ansätzen.

Die Aufprallkraft, welche ein Festkörper beim Fall aus einer definierten Höhe auf seine Grundfläche ausübt, lässt sich wie nachfolgend beschrieben berechnen.

Beim freien Fall eines Festkörpers aus einer definierten Höhe h erfährt dieser die Erdbeschleunigung g mit $9,81 \text{ m/s}^2$. Die Geschwindigkeit v , welcher der Körper bei dem Aufprall auf den Boden besitzt, kann nach Gleichung 1 ermittelt werden.

$$v = \sqrt{2gh} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Kraft, welche die Geschwindigkeit des Körpers wieder auf Null abbremst, gilt als konstant für den materialabhängigen Bremsweg s . Somit kann die Beschleunigung a , mit welcher der Körper abgebremst wird, nach Gleichung 2 berechnet werden.

$$a = \frac{v^2}{2s} \quad \text{Gl. 2}$$

Um die Beschleunigung in Abhängigkeit des Bremsweg und der Höhe angeben zu können, wird die in Gleichung 1 ermittelte Geschwindigkeit in die in Gleichung 2 dargestellte Beschleunigungsfunktion eingesetzt. Es ergibt sich Gleichung 3.

$$a = \frac{g \cdot h}{s} \quad \text{Gl. 3}$$

Die Kraft F , die ein Körper, mit der Masse m beim Aufprall auf die Auflage ausübt, ist gegeben durch Gleichung 4.

$$F = ma = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} \quad \text{Gl. 4}$$

Der Bremsweg s ist vom Material und somit vom Werkstoff der Lagerung abhängig. Die Art der Lage-

rung kann dabei nicht in dem Maße verändert werden, dass eine deutliche Reduktion erzielt werden kann. Somit wird der Bremsweg s bei unveränderter Unterlage als konstant angesehen. Die Erdbeschleunigung g ist eine Naturkonstante.

Als einzige Option stellt sich lediglich die Fallhöhe h dar. Bei konstanten Faktoren m , g und s kann somit durch Reduktion der Fallhöhe h auf die halbe Höhe eine Halbierung der Aufprallkraft erzeugt werden. Die Veränderungen im Hinblick auf Reibungskräfte sind dabei als minimal anzusehen und können vernachlässigt werden.

Eine Modifikation des Prüfgeräts kann somit auf eine praktikable Art und Weise durch Veränderung der Befestigungsposition entlang des Führungsstabes gewährleistet werden (Bild 9).

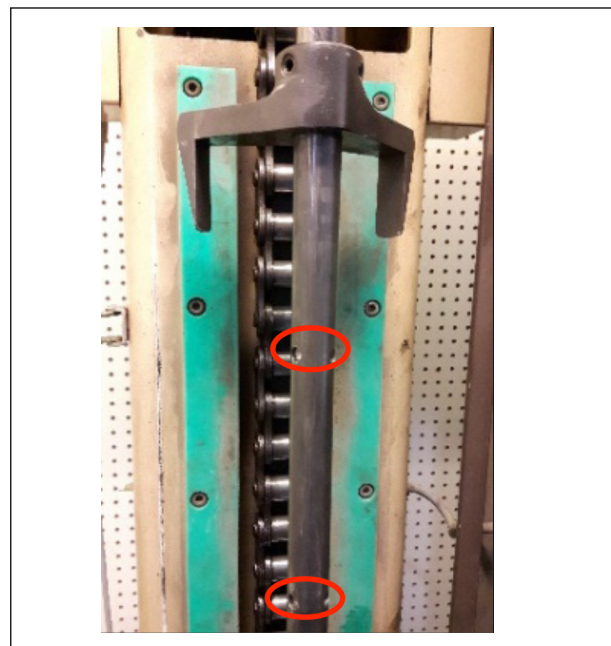


Bild 9: Modifikation der Befestigungsposition des Fallgewichts bei der MPK-Prüfung



Bild 10: Kraftmessdose zur Bestimmung der aufgebrauchten Aufprallkraft

Die Validierung der theoretischen Berechnung erfolgte dabei durch eine Kraftmessdose. Die Kraftmessdose wurde dafür unter einem Referenzkeil und unter Verhinderung einer seitlichen Verschiebung gelagert. Bild 10 stellt den Versuchsaufbau dar. Die Belastung des Referenzprüfkörpers erfolgt dabei wie bei der Prüfung nach [TP Asphalt-StB, Teil 30].

Eine zusätzliche Variation wurde durch eine unterschiedliche Anzahl der Verdichtungsschläge sowie durch Berücksichtigung einer geeigneten Verdichtungstemperatur umgesetzt. Die Verdichtungstemperatur wurde anhand der Bindemittleigenschaften sowie der rheologischen Mörtel­eigenschaften definiert.

Die PMA-Marshall-Probekörper weisen im Allgemeinen materialbedingt eine vergleichsweise hohe Offenporigkeit an der Oberseite auf. Diese äußerlich zugänglichen Hohlräume bewirken, dass Wasser während der Tauchwägung in die Hohlräume eindringt, welches nach Entnahme aus dem Tauchbecken aber direkt aus dem MPK ausfließt. Zur Vermeidung dieses Einflusses wurde an einer Proben­serie vor der Bestimmung der Raumdichte, wie in Bild 11 aufgezeichnet, die hohlräumreiche Phase des Probekörpers abgetrennt.

Jeder Probekörper wurde anhand von vier Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte geprüft.

- Raumdichte durch Tauchwägung [TP Asphalt-StB 07/13]
- Raumdichte durch Ausmessen [TP Asphalt-StB 07/13]
- Mod. Raumdichte durch Tauchwägung
- Mod. Raumdichte durch Ausmessen

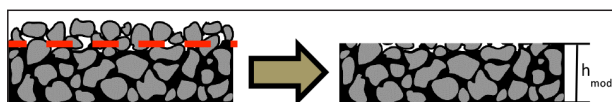


Bild 11: Modifizierte Probekörperhöhe am mod. MPK

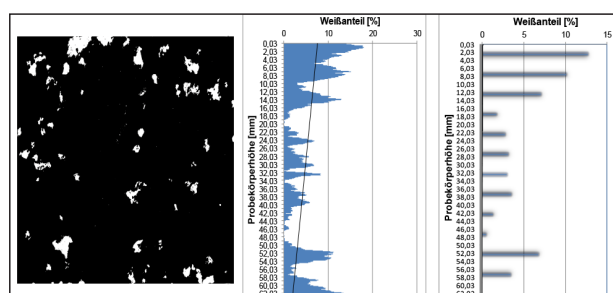


Bild 12: Darstellung der Hohlraumverteilung anhand des Weißanteils [SEDAGHAT, 2012]

Neben der Ermittlung des Hohlraumgehaltes erfolgt darüber hinaus die Bewertung der Hohlraumverteilung anhand des senkrecht zur Oberfläche geschnittenen Probekörpers. Zur Quantifizierung der Hohlraumverteilung wurde an den geschnittenen Probekörperflächen ausgewählter Proben der Weißanteil mittels computergestützter Software ausgewertet. Damit standen insgesamt fünf Bewertungsverfahren für die Beurteilung von Asphaltprobekörpern zur Verfügung.

Das Ergebnis der computergestützten Auswertung ist exemplarisch in Bild 12 dargestellt.

5.2.3 Optimierung der Probekörperherstellung im Walz­sektor-Verdichtungsgerät

Generell erfolgt die Herstellung von Asphaltprobekörpern im Laboratorium durch den Einsatz des Walz­sektor-Verdichtungsgeräts (WSV) gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] in zwei Verdichtungsstufen. Die erste Verdichtungsphase dient als Vorverdichtung des Asphaltmischguts und simuliert die Verdichtung der Fertigerbohle in der Praxis. Die Hauptverdichtung erfolgt anschließend kraftgesteuert und stellt die Verdichtungsarbeit der Walze dar.

Die Vorverdichtung erfolgt kraftgesteuert bis zu einer Höchstlast von 2,6 kN. Nach [WÖRNER ET. AL., 2006] erfährt die Probeplatte bis zum Erreichen der 2,6 kN unterschiedliche Anzahlen von Walzübergängen, welche abhängig vom Mischgut sowie vom Baustoffprüfer (ebener, gleichmäßiger Einbau des Mischguts in die Verdichtungsform) sind.

Für die Verdichtung von PMA-Mischgut wird nach [AP PMA, 2015] ausschließlich die Phase der Vorverdichtung gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] angewendet. Teilziel war es, Parameter wie Höchstlast, Wegzunahme und Anzahl der Walzübergänge für die einphasige Verdichtung des Mischguts zu untersuchen und gegebenenfalls anzupassen.

In vorangegangenen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass aufgrund der von [WÖRNER ET. AL., 2006] aufgezeigten Problematik bei der Vorverdichtung, respektive im Fall der Verdichtung einer PMA-Platte, unterschiedliche Verdichtungserfolge erzielt werden. Für eine praxisgerechte Verdichtung und Ausbildung der Textur der Oberfläche soll demnach eine zweite, auf die Textur abgestimmte Verdichtungsphase erfolgen. In Anlehnung an die Randbedingungen in situ und die Vorgaben des

[AP PMA, 2015] soll diese Verdichtungsphase erst ab einer Temperatur von $< 130\text{ °C}$ durchgeführt werden. Die Parameter der Verdichtungseinstellungen wurden anhand von drei Mischgutkonzepten angepasst und optimiert. Die Berücksichtigung der zweiten Verdichtungsphase erfolgt unter Berücksichtigung des in situ-Verdichtungsregime, d. h. die maximale Linienlast des Walzsegments wird in Anlehnung an tatsächlich eingesetzte Walzzüge adaptiert:

Beispiel für eine 7-Tonnen-Tandemwalze:

Gewicht der Walze: $7000\text{ kg} \approx 70\text{ kN}$
 Anzahl der Walzbandagen: $2 \approx 70\text{ kN}/2\text{ WB}$
 $= 35\text{ kN} / \text{WB}$
 Breite der Walzbandagen: $1\text{ m} = 35\text{ kN} / 150\text{ cm}$
 $= 0,23\text{ kN/cm}$

Nach dieser Berechnung ergibt sich die Höchstlast im WSV mit einer 7-Tonnen-Tandemwalze mit 1,5 m Bandagenbreite zu ca. $0,23\text{ kN}$ je cm Plattenbreite. Dies entspricht einer Maximallast von etwa $6,1\text{ kN}$, bezogen auf eine Plattenbreite von 26 cm . Die Anzahl der Walzübergänge sowie die Art der Verdichtung (vorzugsweise in Anlehnung an die [TP Asphalt-StB, Teil 33] kraftgesteuert) wurden anhand von Laboruntersuchungen adaptiert.

Mörtelanhaftungen am Trennpapier und damit verbundene Verlagerung/Herauslösen von grober Gesteinskörnung aus der Asphaltmatrix, haben einen signifikanten Einfluss auf die Textur. Dies ist bei vorzeitiger Entfernung des Trennpapiers bei zu hoher Oberflächentemperatur der Probeplatten zu beobachten. Wird das Trennpapier erst nach dem Abkühlen entfernt, kann es dennoch zu Anhaftungen des Papiers an der Oberfläche kommen, welche ebenfalls das Gesamtbild der Textur verfälschen. Diese Problematik sollte durch die Verwendung einer geeigneten Trenneinlage mit geringen adhäsiven Potential zwischen Walzsegment und Asphaltmischgut unterbunden werden. Die Trenneinlage darf keine negativen Auswirkungen auf den Verdichtungsprozess aufweisen. Überprüft wurden u. a. dünne Trenneinlagen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Silikon.

Die Untersuchungen bezüglich der Variation des Verdichtungsmanagement und des Einflusses der Trenneinlage wurden anhand von drei Mischgutkonzepten durchgeführt. In einem ersten Untersuchungsschritt sollte der Herstellung eines ho-

mogenen Mischguts für die Asphaltprobeplatten besondere Bedeutung zukommen.

Die Ergebnisse der verschiedenen Einflüsse auf die Probeplattenherstellung wurden anhand der Raumdichte mittels Tauchwägung (ρ_{bssd}), Ausmessen (ρ_{bdim}) und der modifizierten Raumdichte gemäß Kapitel 5.2.2, mittels Tauchwägung und/oder Ausmessen bewertet. Hierfür wurden aus der Probeplatte drei Bohrkern ($\varnothing 100\text{ mm}$) entnommen. An diesen wurde ebenfalls die Hohlraumverteilung im Schnittbild der Probekörperhälften bewertet. Zusätzlich erfolgte die Bestimmung der Textur der Oberfläche mittels Streifenlichtprojektion an Asphaltprobeplatten zur Überprüfung der lärmtechnisch relevanten Texturparameter (z. B. Gestaltfaktor g).

5.2.4 Prüfverfahren zur Ermittlung des Verformungswiderstandes

Für eine vollständige Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltkonzepten ist u.a. die Bewertung der Performance-Eigenschaften von nachhaltiger Bedeutung. Hierzu zählt insbesondere die Untersuchung des Verformungswiderstandes, der für eine dauerhafte akustische Wirksamkeit von hoher Relevanz ist.

Der Widerstand gegen irreversible Verformungen infolge der Verkehrsbelastung kann sowohl durch statische, als auch durch dynamische Lasteintragung in das System erfolgen. Aufgrund der zyklischen Beanspruchung infolge wiederholter Verkehrsbelastung wurden zwei dynamische Prüfverfahren (dynamischer Stempeleindringversuch, Spurbildungsversuch) und ein statisches Prüfverfahren (statische Eindringtiefe) zur Ermittlung des Verformungswiderstandes herangezogen:

- statische Eindringtiefe nach TP Asphalt-StB, Teil 20, am mod. MPK_{20}
- statische Eindringtiefe nach TP Asphalt-StB, Teil 20, am mod. MPK gemäß Kapitel 5.2.2
- statische Eindringtiefe nach TP Asphalt-StB, Teil 20, am Probekörper aus Asphaltprobeplatten
- dynamische Stempeleindringversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A1, am Bohrkern ($\varnothing 150\text{ mm}$) aus Asphaltprobeplatten gemäß Kapitel 5.2.3
- Spurbildungsversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 22, an Asphaltprobeplatten gemäß Kapitel 5.2.3

Die Untersuchungen erfolgten an zwölf verschiedenen PMA-Varianten mit systematischer Veränderung der Zusammensetzungen.

Ausgehend von den Ergebnissen der Untersuchungen zum Verformungswiderstand, respektive der Verformungsbeständigkeit, soll das optimale Prüfverfahren und der zugehörige Probekörper zur Bewertung dieser Kenngröße vorgeschlagen werden.

5.3 Konzeption einer Prüfsystematik für PMA und Validierung anhand von Laborproben

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitsschritte, wurde eine Prüfsystematik formuliert, welche die Herstellung eines repräsentativen Probekörpers sowie die Dokumentation des maßgeblichen Prüfverfahrens zur Bestimmung des Verformungswiderstands beinhaltet. Diese Prüfsystematik wurde mit sechs verschiedenen Mischgutvarianten validiert.

Die Prüfsystematik wurde durch die entsprechenden Untersuchungen am modifizierten Marshall-Probekörper mit den vier untersuchten Verfahren zur Raumdichtebestimmung und der Visualisierung der Hohlraumverteilung mittels Schnittbilder der Probekörperhälften untersucht. Erweiternd wurde der Anteil der zugänglichen Hohlräume in Anlehnung an [ALP AStB, Teil 1] bestimmt.

Die Asphaltprobeplatten wurden anhand der Ergebnisse der Untersuchungen des Kapitels 5.2.3 hergestellt und durch die vier Verfahren zur Raumdichtebestimmung untersucht. Eine vergleichende Betrachtung der Hohlraumverteilung zwischen Asphaltprobeplatte und MPK sollte durch Untersuchung der Schnittflächen der Asphaltprobeplatten durchgeführt werden. Mit der Betrachtung eines Längsschnitts durch die Asphaltprobeplatten wurde zudem die Hohlraumverteilung über die gesamte Asphaltprobeplatte überprüft. Darüber hinaus wird der Kornverlust jeder Variante durch die Untersuchung mit der Oberflächenverschleißprüfmaschine „Darmstadt Scuffing Device (DSD)“ sowie die Textur der Oberfläche mittels Streifenlichtprojektion gemessen. An aus den Asphaltprobeplatten entnommenen Bohrkernen wurde dann der Anteil der zugänglichen Hohlräume in Anlehnung an [ALP AStB, Teil 1] bestimmt.

Die sechs Mischgutkonzepte umfassten vier im Labor hergestellte Varianten sowie zwei Rückstellpro-

ben aus abgeschlossenen Baumaßnahmen (A 553 und A 33). Neben den Rückstellproben liegt eine detaillierte Dokumentation der Baumaßnahmen vor. Auf dieser Basis ist eine Bewertung der Korrelation der Prüfsystematik zwischen Laboratorium und Praxis möglich.

Die vier im Labor hergestellten Varianten umfassten zwei gemäß der Prüfsystematik optimalen Varianten mit zwei unterschiedlichen Arten grober Gesteinskörnung sowie zwei reproduzierte Varianten der Rückstellproben für den Vergleich zwischen Mischgutherstellung im Labor und in der Praxis. Die Auswahl der entsprechenden Materialien wurde für alle Varianten nachvollziehbar dokumentiert.

5.4 Validierung der Prüfsystematik anhand einer Baumaßnahme

Die in der ersten Projektphase konzipierte Prüfsystematik wurde in der zweiten Projektphase anhand einer Baumaßnahme validiert.

Aufgrund von einer elementaren Erkenntnis, welche sich im Laufe des Forschungsprojektes hinsichtlich der Bauweise PMA ergab, beschloss der begleitende Betreuungsausschuss, dass lediglich das Kontrollmischgut einer in der Durchführung befindlichen Baumaßnahme mit der konzipierten Prüfsystematik untersucht werden sollte.

Dafür sollte die bestehende Erstprüfung als Grundlage verwendet und der Einbau durch eine Dokumentation der Einbaurandbedingungen dokumentiert werden.

Das Kontrollmischgut sollte verwendet werden, um eine Herstellung und Bewertung von mod. MPK₂₀ gemäß Projektphase 1.3.2 durchzuführen. Zusätzlich sollten Asphaltprobeplatten gemäß der in der ersten Projektphase definierten Methode hergestellt und Bohrkern aus diesen entnommen werden.

Eine vergleichende Betrachtung zwischen den MPK und den entnommenen Bohrkernen sollte, unter Einbezug der Ergebnisse der Praxisbaumaßnahme, die entwickelte Herstellungsverfahren zur Erzeugung eines praxisrelevanten Probekörpers validieren.

Zusätzlich wurde der Verformungswiderstand des PMA-Mischguts durch Untersuchungen am repräsentativen Probekörper ermittelt.

Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung sollten für eine weitere Optimierung der Prüfsystematik verwendet werden.

6 Ergebnisse und Auswertung

6.1 Gemischkomponenten

6.1.1 Füller

Mit dem Ziel einer hinreichenden Variation der Eigenschaften und einer baupraktischen Relevanz wurden vier Kalksteinfüller ausgewählt und untersucht.

Die mittels Pyknometer-Verfahren ermittelten Rohdichten der Füller wurden gemäß [DIN EN 1097-7] gemessen und sind in Tabelle 7 tabellarisch aufgeführt.

Füllersorte	Rohdichte [g/cm ³]
KS1	2,722
KS2	2,727
KS3	2,765
KS4	2,746

Tab. 7: Rohdichten der Kalksteinfüller

Füllersorte	Siebdurchgang [M.%]				
	Siebgröße [mm]				
	0,5	0,25	0,125	0,075	0,063
KS1	-	-	100,0	95,2	91,1
KS2	100,0	99,7	99,0	89,2	82,7
KS3	100,0	99,4	93,8	86,7	73,5
KS4	100,0	99,0	94,9	86,4	69,5

Tab. 8: Ergebnis der Luftstrahlsiebung der untersuchten Füller

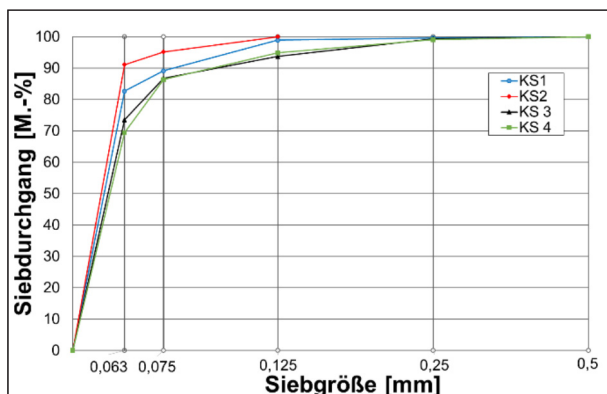


Bild 13: Siebrückstände der Luftstrahlsiebung

Die Korngrößenverteilung der Füller wurde durch Luftstrahlsiebung gemäß [TP Gestein-StB 08, Teil 4.1.4] in Verbindung mit [DIN EN 933-10] durchgeführt (Tabelle 8 und Bild 13).

Zusätzlich wurde die Sieblinie der Füller durch eine Sedimentationsanalyse gemäß [DIN 18123] bestimmt (Bild 14).

Die Hohlraumgehalte der Füller nach Ridgen gemäß [DIN EN 1097-4] sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Die versteifende Wirkung der Füller im Bitumen wurde anhand der Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel (D EP RuK) in Anlehnung an [DIN EN 13179-1] bestimmt.

Um eventuelle Unterschiede in der versteifenden Wirkung bei Verwendung unterschiedlicher Bindemittel zu identifizieren, wurden alle im Forschungsprojekt verwendeten Bindemittel in die Untersuchungen einbezogen. Dazu wurden aufbauend auf [YIGITSOY, 2016] Proben aus den neun Bitumenarten (B1 bis B9 gemäß Tabelle 3) und den vier Füllersorten (KS1 bis KS4 gemäß Tabelle 4) in jeweils unterschiedlichen Verhältnissen gemischt und untersucht. Die Ermittlung der Erweichungspunkte Ring und Kugel erfolgte bei zwei repräsentativen Füller-Bitumen-Verhältnissen, welche für die PMA-Bauweise den Grenzbereich (siehe Tabelle 1)

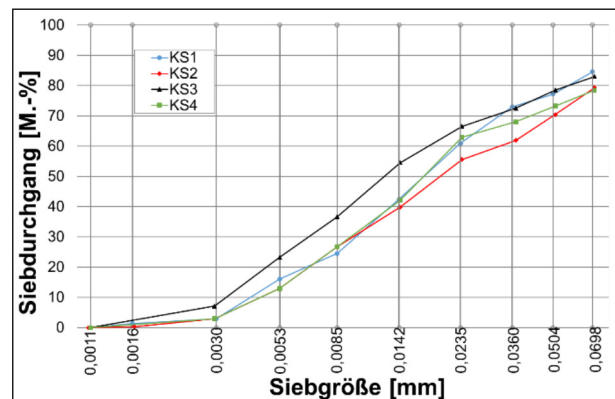


Bild 14: Korngrößenverteilung der Füller durch Sedimentationsanalyse nach [DIN 18123]

Füllersorten	Hohlraumgehalt nach Ridgen [Vol.-%]
KS1	35,7
KS2	34,2
KS3	37,2
KS4	39,7

Tab. 9: Hohlraumgehalte nach Ridgen der Kalksteinfüller

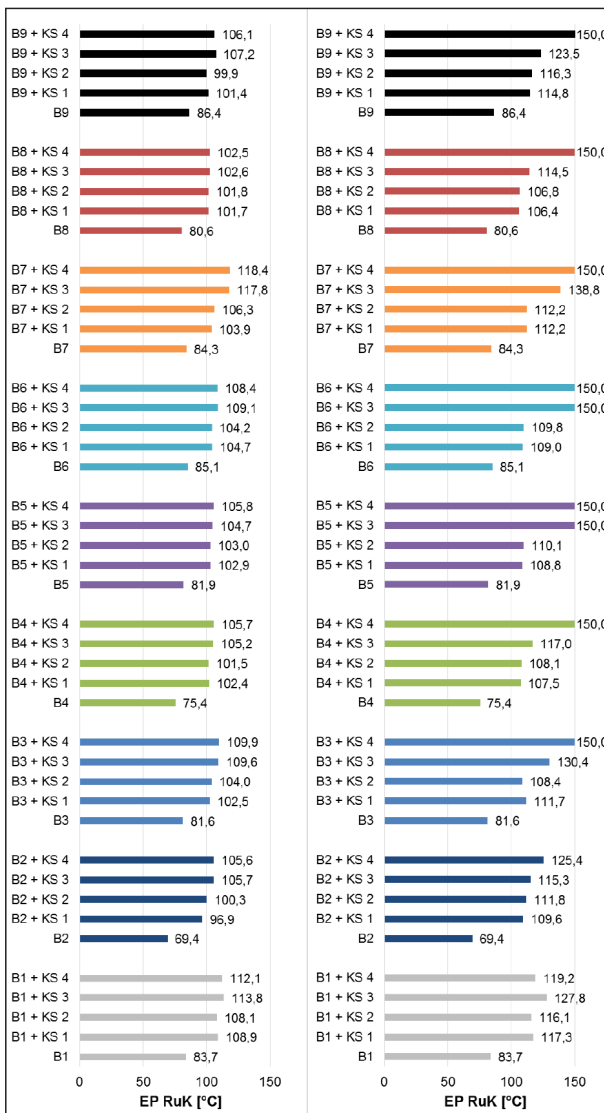


Bild 15: Versteifende Wirkung der untersuchten Füller unter Verwendung von Teilergebnissen von [YIGITSOY, 2016]

Feine Gesteinskörnung	Rohdichte [g/cm³]
NS1	2,635
NS2	2,631
NS3	2,628
NS4	2,635
NS5	2,630
NS6	2,627

Tab. 10: Rohdichten der Natursande

darstellen. Die Verhältnisse setzen sich zum einen aus der unteren Grenze mit einem Verhältnis von 1,9 und zum anderen aus der oberen Grenze mit einem Verhältnis von 3,0 zusammen.

Der für die vier Füller festgestellte Anstieg des EP RuK ist in Bild 15 dargestellt. Zusätzlich sind die

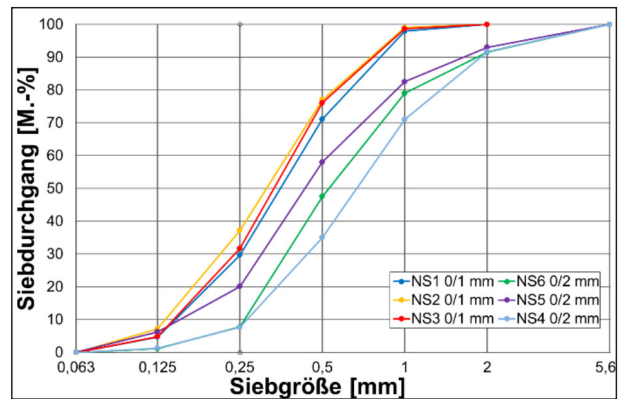


Bild 16: Korngößenverteilung der Natursande

Feine Gesteinskörnung	Fließkoeffizient E_{CS} [s]
NS1	26,5
NS2	23,1
NS3	24,4
NS4	29,1
NS5	25,9
NS6	28,0

Tab. 11: Fließkoeffizient ECS der Natursande

EP RuK der verwendeten Frischbindemittel aufgeführt.

Es kann festgestellt werden, dass KS1 die geringsten und KS4 die höchsten versteifenden Eigenschaften aufweisen.

6.1.2 Feine Gesteinskörnung

Die Rohdichten der Natursande wurden gemäß [DIN EN 1097-7] sowohl an der Fraktion 0/2 mm wie auch an der Fraktion 0/1 mm bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Die an den Natursanden ermittelten Korngrößenverteilungen gemäß [DIN EN 933-1] sind in Bild 16 dargestellt.

Die untersuchten Natursande erfüllen die in den [TL Gestein-StB 07] vorgeschriebenen Anforderungswerte an den Überkornanteil.

Die für die Natursande ermittelten Fließkoeffizienten gemäß [DIN EN 933-6] fasst Tabelle 11 zusammen.

Alle Natursande weisen erwartungsgemäß E_{CS} -Werte kleiner als 30 auf.

Grobe Gesteinskörnung	Rohdichte [g/cm ³]
Diabas 2/5	2,825
Grauwacke 2/5	2,710

Tab. 12: Rohdichten der groben Gesteinskörnung

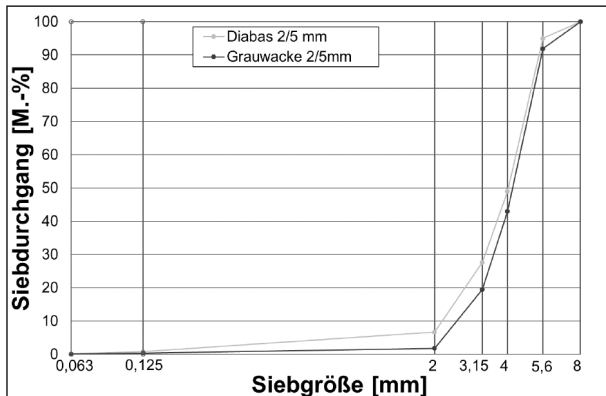


Bild 17: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung

6.1.3 Grobe Gesteinskörnung

Als grobe Gesteinskörnung wurden ein Diabas 2/5 mm und eine Grauwacke 2/5 mm ausgewählt. Die Bestimmung der Rohdichten gemäß [DIN EN 10977] wurde im Rahmen der Untersuchungen vorgesehen. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Die ermittelten Korngrößenverteilungen gemäß [DIN EN 933-1] sind in Bild 17 abgebildet.

Die untersuchten groben Gesteinskörnungen erfüllen die in den [TL Gestein-StB 07] vorgeschriebenen Anforderungswerte an den Über- und Unteranteil.

6.1.4 Bindemittel

An den ausgewählten Bindemitteln wurden die Nadelpenetration [DIN EN 1426], der Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) [DIN EN 1427] und eine performance-orientierte Prüfung mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR) [DIN EN 14770] durchgeführt.

Eine Zusammenstellung der Bitumenkennwerte enthält Tabelle 13.

6.2 Mörtelsteifigkeit

Für die Untersuchungen an Mörtel-Gemischen im Ausflussviskosimeter [DIN EN 12846-1] wurden vorwiegend die Füller KS1 und KS2 mit der feinen

	EP RuK	Nadelpen.	DSR-Prüfung	
			dEG*	EG*
	[°C]	[1/10 mm]	[°]	[°C]
B1	83,5	22,8	51,8	65,5
B2	76,1	31,3	70,3	64,1
B3	70,8	28,4	64,6	65,3
B4	80,7	51,0	56,6	61,0
B5	82,0	21,8	66,7	64,5
B6	85,0	23,3	59,4	64,7
B7	84,5	18,1	67,6	69,1
B8	72,0	32,0	60,8	66,7
B9	92,0	34,3	44,9	71,0

Tab. 13: Kennwerte der verwendeten Bitumen

Gesteinskörnung NS1 und NS4 in Kombination mit Bindemittel B1 geprüft.

Darüber hinaus wurden gezielt Untersuchungen unter Verwendung von KS4 und NS5 durchgeführt und analysiert (Tabelle 14).

Die Untersuchungen wurden bei Temperaturen von 140 °C bis 200 °C in 20 °C-Schritten in Doppelbestimmung durchgeführt. Die Erfassung der Ergebnisse erfolgte gemäß Kapitel 5.2.1.

6.2.1 Variation des Bindemittels

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss des verwendeten Bindemittels untersucht. Es wurden sechs weitere Bindemittel in Kombination mit den drei Gesteinskörnungsverhältnissen untersucht (Tabelle 15).

In Bild 18 ist die Mörtelsteifigkeit in Abhängigkeit vom verwendeten Bindemittel dargestellt. Die Ausflussmenge nach 20 s ist als durchgezogene Linie dargestellt, die zugehörige Ausflusszeit zwischen 25 g und 75 g in der gleichen Farbe als gestrichelte Linie. Bei gleicher Mörtelzusammensetzung zeigt sich die erwartete Abhängigkeit von der Bindemittelsteifigkeit.

6.2.2 Variation des Bindemittelvolumens

Eine Variation des Bindemittelvolumens wurde durch verschiedene Gestein/Bindemittel-Verhältnisse (G/B) erzielt.

Var.	Anteil Binde- mittel [M.-%]	Anteil Ge- stein [M.-%]	Zusammensetzung Gestein [M.-%] (unter Verwendung des Bindemittels B1)				Ausflussmenge nach 20 s [g]				Ausflusszeit zwischen 25-75 g [s]			
							140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C
1	23	77	60	KS1	40	NS1	66,0	122,4	162,0	170,1	14,0	5,8	2,6	2,0
2			60	KS1	40	NS4	29,3	48,6	116,7	164,4	26,8	22,8	7,9	4,8
3			60	KS2	40	NS1	69,3	119,4	173,7	176,3	13,6	6,0	2,8	1,5
4			60	KS2	40	NS4	29,7	72,0	114,3	180,6	15,2	8,2	3,9	2,6
5			60	KS4	40	NS5	45,0	97,3	124,7	143,6	22,0	12,7	5,4	3,9
6			70	KS1	30	NS1	59,7	102,0	154,2	171,0	16,2	8,0	3,8	1,9
7			70	KS1	30	NS4	31,2	57,0	107,1	123,5	37,9	19,0	8,8	4,8
8			70	KS1	30	NS2	61,3	103,2	156,4	174,1	15,8	7,8	3,7	1,8
9			70	KS1	30	NS5	31,3	59,3	109,8	126,1	36,5	18,7	8,8	4,9
10			70	KS2	30	NS1	50,1	117,6	163,5	171,9	19,3	6,2	3,1	1,8
11			70	KS2	30	NS4	47,7	104,4	152,1	164,3	25,9	9,3	5,2	3,6
12			80	KS1	20	NS1	34,5	85,5	148,8	169,8	29,2	10,1	4,2	2,3
13			80	KS1	20	NS4	20,4	52,8	112,5	139,2	69,2	21,4	8,6	4,2
14			80	KS2	20	NS1	42,3	94,2	151,2	174,6	23,8	9,2	3,9	2,2
15			80	KS2	20	NS4	43,2	79,8	127,8	158,3	29,2	13,2	6,9	3,7
16	20	80	60	KS1	40	NS1	39,5	76,4	132,2	178,6	29,4	13,6	6,6	3,1
17			60	KS1	40	NS4	41,1	75,6	139,5	180,9	26,4	12,0	4,9	2,5
18			60	KS2	40	NS1	36,9	83,1	156,0	186,6	29,7	11,2	4,3	2,6
19			60	KS2	40	NS4	50,1	110,1	166,8	181,2	20,0	7,2	3,6	2,2
20			70	KS1	30	NS1	34,2	66,1	131,9	187,3	36,2	16,0	6,6	2,5
21			70	KS1	30	NS4	33,3	59,1	109,5	177,0	34,7	16,6	7,5	2,8
22			70	KS2	30	NS1	25,5	69,0	119,4	180,0	41,6	13,3	6,5	2,6
23			70	KS2	30	NS4	31,9	87,9	135,6	184,8	31,8	10,0	5,2	2,3
24			80	KS1	20	NS1	17,2	34,5	79,5	110,5	81,2	34,0	12,8	6,0
25			80	KS1	20	NS4	n.a.	44,4	84,3	125,7	n.a.	24,6	11,2	6,0
26			80	KS2	20	NS1	n.a.	51,9	100,5	132,6	n.a.	20,5	9,2	5,5
27			80	KS2	20	NS4	n.a.	58,2	114,3	147,3	n.a.	17,2	7,4	4,5
28			18	82	60	KS1	40	NS1	n.a.	59,4	108,9	161,4	n.a.	16,8
29	60	KS1			40	NS4	n.a.	66,3	122,1	172,2	n.a.	14,4	6,6	4,0
30	60	KS2			40	NS1	n.a.	45,6	103,5	151,8	n.a.	24,4	8,5	4,7
31	60	KS2			40	NS4	n.a.	79,5	149,4	187,5	n.a.	11,8	4,7	3,1
32	70	KS1			30	NS1	n.a.	45,3	88,8	144,0	n.a.	23,8	10,4	5,0
33	70	KS1			30	NS4	n.a.	57,9	111,9	143,7	n.a.	17,7	7,6	4,7
34	70	KS2			30	NS1	n.a.	37,2	61,2	121,5	n.a.	29,4	16,4	6,5
35	70	KS2			30	NS4	n.a.	33,9	54,3	105,3	n.a.	32,4	18,1	8,3
36	80	KS1			20	NS1	n.a.	12,6	28,5	63,6	n.a.	75,4	40,8	16,7
37	80	KS1			20	NS4	n.a.	13,2	38,7	85,2	n.a.	73,5	28,0	11,2
38	80	KS2			20	NS1	n.a.	19,8	45,3	92,4	n.a.	56,3	23,6	9,9
39	80	KS2	20	NS4	n.a.	20,4	48,0	100,8	n.a.	65,3	21,8	9,0		

Tab. 14: Untersuchungsergebnisse der Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter unter Variation des Bindemittelvolumens

Var.	Anteil Binde- mittel [M.-%]	Anteil Ge- stein [M.-%]	Zusammensetzung Gestein [M.-%] (unter Verwendung des Bindemittels B1)				Ausflussmenge nach 20 s [g]				Ausflusszeit zwischen 25-75 g [s]			
							140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C
40	15	85	60	KS1	40	NS1	n.a.	n.a.	13,8	51,3	n.a.	n.a.	n.a.	19,8
41			60	KS1	40	NS4	n.a.	n.a.	n.a.	57,9	n.a.	n.a.	n.a.	12,6
42			60	KS2	40	NS1	n.a.	n.a.	n.a.	51,9	n.a.	n.a.	n.a.	19,8
43			60	KS2	40	NS4	n.a.	n.a.	n.a.	81,9	n.a.	n.a.	n.a.	11,2
44			70	KS1	30	NS1	n.a.	n.a.	n.a.	36,0	n.a.	n.a.	n.a.	29,2
45			70	KS1	30	NS4	n.a.	n.a.	n.a.	18,3	n.a.	n.a.	n.a.	26,3
46			70	KS2	30	NS1	n.a.	n.a.	n.a.	24,9	n.a.	n.a.	n.a.	48,2
47			70	KS2	30	NS4	n.a.	n.a.	n.a.	22,8	n.a.	n.a.	n.a.	51,9
48			80	KS1	20	NS1	n.a.	n.a.	n.a.	10,8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
49			80	KS1	20	NS4	n.a.	n.a.	n.a.	10,5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
50			80	KS2	20	NS1	n.a.	n.a.	n.a.	4,2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
51			80	KS2	20	NS4	n.a.	n.a.	n.a.	12,6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Tab. 14: Fortsetzung

Var.	Anteil Binde- mittel [M.-%]	Bin- de- mittel	Anteil Ge- stein [M.-%]	Zusammensetzung Gestein [M.-%]				Ausflussmenge nach 20 s [g]				Ausflusszeit zwischen 25-75 g [s]				
								140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	
52	23	B7	77	60	KS1	40	NS3	5,4	33,0	96,6	139,2	n.a.	47,0	8,0	4,0	
53				70	KS1	30	NS3	n.a.	28,6	93,4	133,8	n.a.	54,0	8,5	4,5	
54				80	KS1	20	NS3	n.a.	21,0	85,2	112,2	n.a.	64,0	11,0	6,5	
55	20		80	60	KS1	40	NS3	n.a.	19,2	61,2	115,2	n.a.	60,0	18,0	7,0	
56				70	KS1	30	NS3	n.a.	10,2	72,0	93,0	n.a.	75,0	29,0	9,5	
57				80	KS1	20	NS3	n.a.	5,4	26,4	65,4	n.a.	126,0	42,0	15,0	
58	18		82	60	KS1	40	NS3	n.a.	n.a.	45,0	78,6	n.a.	n.a.	56,0	13,0	
59				70	KS1	30	NS3	n.a.	n.a.	17,4	54,0	n.a.	n.a.	74,0	22,5	
60				80	KS1	20	NS3	n.a.	n.a.	18,0	49,2	n.a.	n.a.	101,0	22,0	
61	23		B2	77	60	KS1	40	NS3	15,6	46,8	111,0	154,2	86,0	19,0	5,0	2,5
62					70	KS1	30	NS3	10,8	25,8	140,4	150,6	130,0	90,0	8,0	3,5
63					80	KS1	20	NS3	6,0	27,6	82,2	120,6	n.a.	57,0	11,0	4,5
64	20			80	60	KS1	40	NS3	1,8	19,8	75,0	132,6	n.a.	60,0	12,5	4,0
65					70	KS1	30	NS3	n.a.	11,4	54,0	99,0	n.a.	139,0	20,5	9,0
66		80			KS1	20	NS3	n.a.	7,8	26,4	59,4	n.a.	182,0	49,0	18,5	
67	18	82		60	KS1	40	NS3	n.a.	4,8	37,8	78,6	n.a.	182,0	30,0	13,0	
68				70	KS1	30	NS3	n.a.	n.a.	20,4	41,4	n.a.	n.a.	87,0	24,5	
69				80	KS1	20	NS3	n.a.	n.a.	16,2	25,2	n.a.	n.a.	116,0	75,5	
70	23	B4		77	60	KS1	40	NS3	56,0	110,4	151,0	159,1	18,0	9,8	3,6	5,0
71					70	KS1	30	NS3	53,7	92,0	147,2	161,0	19,2	12,0	6,8	2,9
72					80	KS1	20	NS3	29,5	82,5	147,8	165,8	31,2	14,1	5,2	6,3
73	20			80	60	KS1	40	NS3	25,5	62,4	122,2	165,6	31,4	17,6	10,6	6,1
74					70	KS1	30	NS3	27,2	58,1	126,9	178,3	38,2	18,0	7,6	5,5
75			80		KS1	20	NS3	15,2	31,5	77,5	108,5	82,2	35,0	15,8	10,0	
76	18		82	60	KS1	40	NS3	n.a.	48,4	98,9	148,4	n.a.	18,8	9,8	6,2	
77				70	KS1	30	NS3	n.a.	38,3	81,8	139,0	n.a.	27,8	11,4	6,0	
78				80	KS1	20	NS3	n.a.	8,6	23,5	58,6	n.a.	78,4	41,8	20,7	

Tab. 15: Untersuchung der Mörtelsteifigkeit unter Variation des Bindemittels

Var.	Anteil Binde- mittel [M.-%]	Bin- de- mittel	Anteil Ge- stein [M.-%]	Zusammensetzung Gestein [M.-%]	Ausflussmenge nach 20 s [g]				Ausflusszeit zwischen 25-75 g [s]				
					140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	
79	23	B6	77	60 KS1 40 NS3	15,6	46,8	111,0	154,2	86,0	19,0	5,0	2,5	
80				70 KS1 30 NS3	10,8	25,8	140,4	150,6	130,0	90,0	8,0	3,5	
81				80 KS1 20 NS3	6,0	27,6	82,2	120,6	n.a.	57,0	11,0	4,5	
82	20		80	60 KS1 40 NS3	1,8	19,8	75,0	132,6	n.a.	60,0	12,5	4,0	
83				70 KS1 30 NS3	n.a.	11,4	54,0	99,0	n.a.	139,0	20,5	9,0	
84				80 KS1 20 NS3	n.a.	7,8	26,4	59,4	n.a.	182,0	49,0	18,5	
85	23		B9	77	60 KS1 40 NS3	n.a.	46,5	94,5	150,9	n.a.	21,3	7,8	4,0
86					70 KS1 30 NS3	n.a.	18,6	78,0	147,0	n.a.	62,6	11,6	4,3
87					80 KS1 20 NS3	n.a.	16,2	53,7	93,0	n.a.	67,8	19,0	9,2
88	20	80		60 KS1 40 NS3	n.a.	21,3	57,0	106,8	n.a.	48,0	17,0	7,6	
89				70 KS1 30 NS3	n.a.	12,3	32,1	84,9	n.a.	87,4	31,5	10,6	
90				80 KS1 20 NS3	n.a.	6,8	17,1	32,1	n.a.	106,9	50,7	34,1	
91	20	B8		80	60 KS1 40 NS3	n.a.	73,8	129	161,1	n.a.	12,7	5,6	3,2
92					70 KS1 30 NS3	n.a.	28,2	86,4	143,7	n.a.	24,4	10,2	4,5
93					80 KS1 20 NS3	n.a.	20,1	57,3	98,7	n.a.	49,8	17,5	8,5
94	18		82	60 KS1 40 NS3	n.a.	41,1	98,8	145,8	n.a.	26,6	16,4	6,6	
95				70 KS1 30 NS3	n.a.	15,3	22,5	81,3	n.a.	62,2	44,9	11,5	
96				80 KS1 20 NS3	n.a.	4,8	13,5	39,6	n.a.	81,7	62,3	26,5	

Tab. 15: Fortsetzung

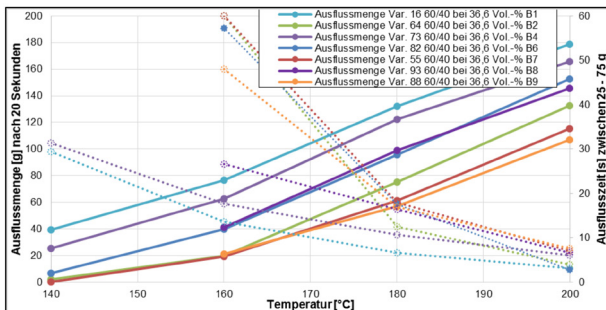


Bild 18: Einfluss des Bindemittels auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter

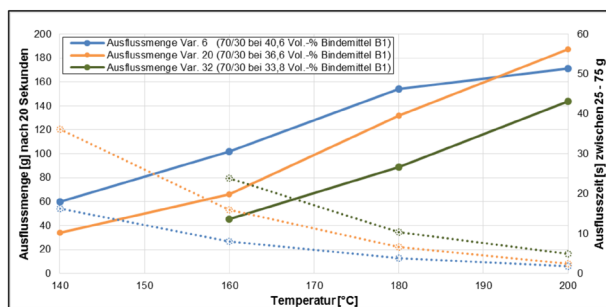


Bild 19: Einfluss des Bindemittelvolumens auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter

Für die verwendeten Verhältnisse wurden die Grenzbereiche der nach [AP PMA, 2015] gegebenen Richtwerte berücksichtigt. Diese setzen sich aus der unteren Grenze mit einem Verhältnis von

Anteil Gestein [M.-%]	Anteil Bindemittel [M.-%]	Bindemittelvolumen [Vol.-%]
77,0	23,0	40,6
80,0	20,0	36,6
82,0	18,0	33,8
85,0	15,0	29,3

Tab. 16: Überblick über untersuchte Bindemittelvolumina

3,3 und der oberen Grenze mit einem Verhältnis von 5,7 zusammen.

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Zusammensetzung der Proben und die durch Variation der Verhältnisse erzielten Bindemittelvolumen.

Das Bild 19 stellt die Ausflussmenge über die Ausflusszeit beispielhaft für die Varianten 5, 17 und 29 gegenüber. Mörtelproben mit der gleichen Gesteinskörnungszusammensetzung und einem Bindemittelvolumen von 29,3 Vol.-% waren zu niedrigviskos und ermöglichten keine Aufzeichnung von repräsentativen Ergebnissen. Die dargestellten Untersuchungen unterscheiden sich in ihrem Bindemittelvolumen gemäß der Tabelle 16.

Zusätzlich ist die Abhängigkeit von der Versuchstemperatur dargestellt.

Erwartungsgemäß verringert sich mit der Erhöhung des Bindemittelvolumens die Viskosität des Mörtels.

6.2.3 Variation der Gesteinskörnung

Für die Untersuchung des Einflusses der feinen Gesteinskörnung auf die Mörtelviskosität wurde anhand von Messungen mit KS1 und KS2 in Kombination mit NS1 und NS4 ein Vergleichshintergrund geschaffen.

Der Einfluss der feinen Gesteinskörnung wurde hinsichtlich der Parameter Größtkorn, Füllerart, Gewinnungsstätte und Massenverhältnis von Füller zu feiner Gesteinskörnung untersucht. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt analog zu Bild 18 in Form von durchgezogenen und gestrichelten Linien.

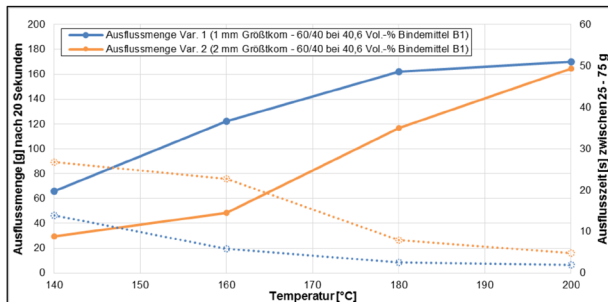


Bild 20: Einfluss des Größtkorns auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter (F/fGk 60:40)

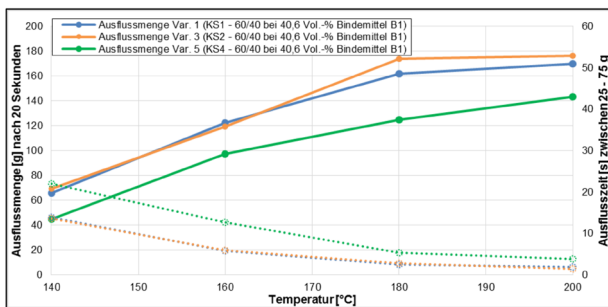


Bild 21: Einfluss der Füllerart auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter

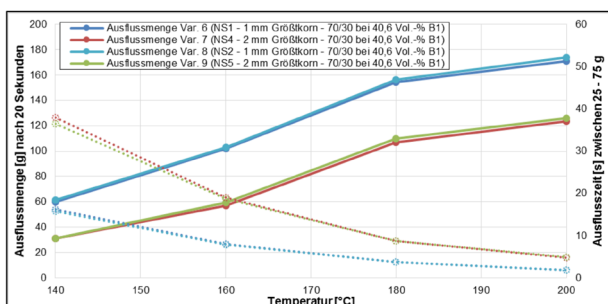


Bild 22: Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Mörtelsteifigkeit

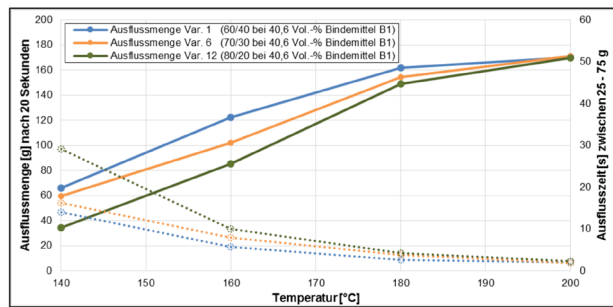


Bild 23: Einfluss des Massenverhältnisses von Füller und feiner Gesteinskörnung auf die Mörtelsteifigkeit

Einfluss des Größtkorns

Hinsichtlich des Einflusses des verwendeten Größtkorns der feinen Gesteinskörnung konnte festgestellt werden, dass ein kleineres Größtkorn die Fließfähigkeit des Mörtels signifikant beschleunigen kann. In Bild 20 ist ein Vergleich zwischen einem Größtkorn von 1 mm und 2 mm bei einem Füller/Gesteinsverhältnis (F/fGk) von 60:40 dargestellt. Bei Analyse der in Tabelle 14 dargestellten Werte ist zusätzlich festzustellen, dass mit Abnahme des Anteils der feinen Gesteinskörnung erwartungsgemäß der Einfluss des verwendeten Größtkorns abnimmt.

Einfluss der Füllerart

Der Einfluss des Füllers wurde durch vergleichende Untersuchungen mit den Füllern KS1, KS2 und KS4 ermittelt. Die beiden erstgenannten stammen aus einem Werk und haben, bezogen auf den Hohlraumgehalt nach Rigden, ähnlich versteifende Eigenschaften. Der Füller KS 4 hat im Vergleich zu diesen beiden Füllern eine höhere versteifende Wirkung.

Zwischen KS1 und KS2 konnten keine nennenswerten Unterschiede im Hinblick auf die Mörtelsteifigkeit festgestellt werden. Der etwas feinere Füller führt erwartungsgemäß zu niedriger Steifigkeit des Mörtels. Dies wird nachfolgend in Bild 21 veranschaulicht.

Weiter ist zu erkennen, dass Mörtelvarianten unter Verwendung eines stark versteifenden Füllers (KS4) eine höhere Steifigkeit aufweisen.

Einfluss der feinen Gesteinskörnung

Der Einfluss der feinen Gesteinskörnung wurde durch Untersuchungen an Natursanden aus einer weiteren Gewinnungsstätte vergleichbar gemacht.

Die Kornklassen waren dabei weiter auf ein Größtkorn von 1 mm und 2 mm begrenzt.

In Bild 22 sind die gemessenen Werte für eine vergleichende Betrachtung dargestellt.

Zusammenfassend kann analysiert werden, dass Natursande mit ähnlichen Fließkoeffizienten eine vergleichbare Mörtelsteifigkeit bewirken.

Einfluss der Massenverhältnisse von Füller und feiner Gesteinskörnung

Eine weitere Auswertung findet hinsichtlich des Füller-/Gesteinsverhältnisses statt. Gemäß Tabelle 14 wurden Massenverhältnisse 60:40, 70:30 und 80:20 betrachtet. In Bild 23 sind die Messergebnisse der Massenvariation bei ansonsten gleichbleibenden Materialparametern dargestellt.

Ein erhöhter Anteil des Füllers führt insbesondere im niedrigen Temperaturbereich zu deutlicher Beeinflussung der Mörtelsteifigkeit in Form eines steiferen Materialverhaltens.

6.3 Untersuchungen an mod. MPK

Die Modifikationen am Marshall-Verdichtungsgerät erfolgten gemäß Kapitel 5.2.2.

Eine umfangreiche Untersuchung an Marshall-Probekörpern unter Variation der Herstellungs- und Prüfbedingungen sollte dabei das optimale Verfahren zur Probekörperherstellung von MPKs herauskristallisieren.

Es wurden Untersuchungen an neun Asphaltkonzepten, welche sich hinsichtlich Sieblinie und Bindemittelauswahl gemäß Tabelle 17 unterscheiden, durchgeführt.

Die Auswahl der gewählten Varianten erfolgte dabei unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Mörtelsteifigkeit und einer visuellen Begutachtung des Schnittbildes an einem gemäß [AP PMA, 2015] her-

Asphaltvariante	Gesteinsart			Bindemittel	
	KS1	NS1 (0/1)	Diabas 2/5		
[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[-]	[M.-%]
A1	16,5	11,0	72,5	B7	6,6
A2	18,7	8,0	73,3	B7	6,8
A3	20,0	5,0	75,0	B7	7,5
B1	16,5	11,0	72,5	B6	6,6
B2	18,7	8,0	73,3	B6	6,8
B3	20,0	5,0	75,0	B6	7,5
C1	16,5	11,0	72,5	B1	6,6
C2	18,7	8,0	73,3	B1	6,8
C3	20,0	5,0	75,0	B1	7,5

Tab. 17: Auswahl von neun geeigneten Asphaltkonzepten für Untersuchungen an modifizierten Marshall-Probekörpern



Bild 24: Schnittbild eines mod. MPK20 gemäß [AP PMA, 2015] in PMA-Bauweise

gestellten MPK. An diesen wurden die Raumdichten gemäß den in 5.2.2 beschriebenen Verfahren zur Raumdichtebestimmung gemessen.

Zusätzlich erfolgten eine rechnerische Ermittlung des Hohlraumgehaltes (V) – vor und nach der Modifizierung – sowie eine statistische Auswertung hinsichtlich der Spannweite der Messergebnisse der Raumdichte ($\Delta\rho$).

Die Überprüfung des Absinkens der Mörtelphase erfolgte dabei an einem vierten Marshall-Probekörper durch einen senkrechten Schnitt zur Visualisierung

der Hohlraumverteilung. Bild 24 zeigt beispielhaft die Hohlraumverteilung am MPK. Die Auswertung erfolgte zunächst visuell.

Tabelle 18 gibt einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse an MPK unter Variation der Schlagzahl aus voller Fallhöhe.

Die angegebenen Werte sind arithmetische Mittelwerte aus einer Dreifach-Bestimmung. Die Präzision der Messungen an mod. MPK stellt in diesem Zusammenhang eine wichtige Beurteilungsgröße dar.

Asphalt-Variante / Messmethode	Volle Fallhöhe														
	10 Schlag			15 Schlag			20 Schlag			25 Schlag			30 Schlag		
	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp
	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]
A1 _{bssd}	2,247	10,36	0,004	2,281	9,01	0,033	2,318	7,53	0,017	2,364	5,69	0,078	2,367	5,59	0,024
A1 _{bssd,mod}	2,269	9,48	0,006	2,304	8,10	0,036	2,341	6,63	0,014	2,354	6,12	0,015	2,318	7,53	0,203
A1 _{bdim}	2,163	13,71	0,015	2,213	11,73	0,052	2,274	9,28	0,014	2,342	6,59	0,136	2,342	6,58	0,034
A1 _{bdim,mod}	2,217	11,58	0,022	2,261	9,83	0,048	2,315	7,66	0,014	2,341	6,63	0,132	2,374	5,32	0,098
A2 _{bssd}	2,229	11,09	0,015	2,260	9,84	0,032	2,300	8,24	0,013	2,372	5,39	0,020	2,385	4,87	0,037
A2 _{bssd,mod}	2,249	10,29	0,028	2,272	9,36	0,025	2,322	7,37	0,011	2,364	5,72	0,028	2,389	4,70	0,048
A2 _{bdim}	2,119	15,46	0,014	2,173	13,33	0,023	2,238	10,73	0,009	2,329	7,11	0,027	2,324	7,31	0,007
A2 _{bdim,mod}	2,165	13,65	0,049	2,196	12,42	0,014	2,283	8,92	0,004	2,351	6,23	0,065	2,350	6,25	0,083
A3 _{bssd}	2,253	10,13	0,067	2,280	9,06	0,051	2,305	8,05	0,047	2,339	6,71	0,026	2,350	6,25	0,026
A3 _{bssd,mod}	2,263	9,73	0,058	2,296	8,41	0,053	2,323	7,35	0,048	2,355	6,06	0,025	2,364	5,69	0,016
A3 _{bdim}	2,168	13,51	0,094	2,211	11,80	0,077	2,253	10,12	0,059	2,298	8,33	0,045	2,330	7,06	0,050
A3 _{bdim,mod}	2,209	11,90	0,084	2,235	10,85	0,040	2,279	9,10	0,048	2,330	7,04	0,039	2,356	6,01	0,046
B1 _{bssd}	2,196	12,11	0,019	2,224	10,99	0,027	2,256	9,72	0,012	2,273	9,05	0,014	2,300	7,97	0,023
B1 _{bssd,mod}	2,201	11,92	0,014	2,234	10,59	0,049	2,281	8,72	0,024	2,290	8,37	0,006	2,332	6,69	0,027
B1 _{bdim}	2,054	17,81	0,009	2,131	14,72	0,045	2,178	12,86	0,037	2,204	11,82	0,024	2,210	11,55	0,082
B1 _{bdim,mod}	2,110	15,56	0,010	2,176	12,93	0,084	2,225	10,96	0,049	2,247	10,09	0,015	2,280	8,76	0,040
B2 _{bssd}	2,246	10,12	0,033	2,273	9,06	0,031	2,304	7,80	0,029	2,356	5,72	0,056	2,397	4,09	0,013
B2 _{bssd,mod}	2,256	9,71	0,033	2,289	8,38	0,026	2,326	6,93	0,031	2,386	4,53	0,052	2,407	3,66	0,011
B2 _{bdim}	2,158	13,63	0,026	2,197	12,07	0,025	2,245	10,15	0,018	2,308	7,63	0,092	2,385	4,57	0,017
B2 _{bdim,mod}	2,185	12,56	0,039	2,247	10,09	0,066	2,292	8,30	0,037	2,373	5,03	0,045	2,424	2,99	0,013
B3 _{bssd}	2,340	6,36	0,165	2,302	7,88	0,041	2,292	8,28	0,046	2,324	7,00	0,006	2,344	6,19	0,015
B3 _{bssd,mod}	2,218	11,23	0,061	2,313	7,44	0,057	2,309	7,61	0,046	2,342	6,30	0,281	2,324	6,98	0,077
B3 _{bdim}	2,384	4,60	0,071	2,239	10,41	0,034	2,226	10,92	0,064	2,289	8,39	0,080	2,321	7,13	0,017
B3 _{bdim,mod}	2,123	15,04	0,077	2,284	8,61	0,070	2,288	8,44	0,102	2,318	7,24	0,079	2,337	6,50	0,020
C1 _{bssd}	2,248	9,07	0,023	2,319	6,20	0,020	2,342	5,25	0,017	2,374	3,97	0,043	2,389	3,36	0,014
C1 _{bssd,mod}	2,269	8,21	0,023	2,337	5,48	0,018	2,367	4,24	0,010	2,398	3,00	0,025	2,403	2,81	0,008
C1 _{bdim}	2,151	13,00	0,016	2,239	9,43	0,022	2,284	7,60	0,033	2,334	5,56	0,116	2,383	3,60	0,042
C1 _{bdim,mod}	2,196	11,16	0,024	2,306	6,70	0,039	2,354	4,79	0,016	2,393	3,20	0,069	2,428	1,78	0,025
C2 _{bssd}	2,259	8,62	0,067	2,307	6,69	0,022	2,347	5,07	0,019	2,356	4,69	0,045	2,377	3,85	0,024
C2 _{bssd,mod}	2,298	7,02	0,056	2,340	5,34	0,023	2,381	3,69	0,020	2,396	3,06	0,027	2,389	3,35	0,033
C2 _{bdim}	2,156	12,77	0,066	2,225	9,98	0,058	2,288	7,46	0,013	2,331	5,71	0,047	2,369	4,19	0,044
C2 _{bdim,mod}	2,226	9,96	0,057	2,293	7,24	0,017	2,369	4,18	0,024	2,385	3,53	0,031	2,392	3,22	0,017
C3 _{bssd}	2,254	8,84	0,055	2,283	7,63	0,019	2,319	6,19	0,025	2,349	4,99	0,029	2,343	5,21	0,061
C3 _{bssd,mod}	2,274	8,01	0,061	2,300	6,96	0,029	2,333	5,61	0,037	2,373	4,02	0,035	2,345	5,13	0,039
C3 _{bdim}	2,137	13,55	0,088	2,263	8,44	0,150	2,250	8,97	0,024	2,309	6,60	0,063	2,319	6,20	0,004
C3 _{bdim,mod}	2,216	10,34	0,075	2,252	8,92	0,051	2,306	6,73	0,039	2,359	4,57	0,047	2,400	2,91	0,012

Tab. 18: Gemessene Raumdichten an Marshall-Probekörpern nach den in Kapitel 5.2.2 aufgelisteten Messmethoden

Gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 6] wird die kritische Spannweite von zwei einzelnen Messwerten auf 0,030 g/cm³ definiert.

Die Prüfserien, bei denen diese Spannweite überschritten wurde sind in der Tabelle 18 orange hinterlegt.

Die Spaltensumme der Abweichungen weist für die Variante mit 20 Verdichtungsschlägen aus voller Fallhöhe einen minimalen Wert von 15 Abweichungen bei 36 Messergebnissen auf. Die Hohlraumgehalte V vor und nach der Modifizierung, gemäß Kapitel 5.2.2, entsprechen nicht den erwarteten Ergebnissen für die 2-Phasen-Struktur des PMA.

Tabelle 19 gibt einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse an MPK unter Variation der Schlagzahl aus reduzierter Fallhöhe (0,75*h).

Die Spaltensumme ergibt ein Minimum für die Variante mit 60 Verdichtungsschlägen. Unter Berücksichtigung des Hohlraumgehaltes ist jedoch festzustellen, dass die so hergestellten MPK keinen PMA-äquivalenten Probekörper darstellen, sondern eine Überverdichtung vorliegt.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 dargestellten 2-Phasen-Struktur eines PMA wird im Idealfall im oberen Drittel der Schicht ein Hohlraumgehalt von 15 bis 20 Vol.-% erzielt. Die restliche Schicht-

Asphalt-Variante / Messmethode	Dreiviertel Fallhöhe														
	20 Schlag			30 Schlag			40 Schlag			50 Schlag			60 Schlag		
	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp
	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]
A1 _{bssd}	2,286	8,82	0,102	2,314	7,70	0,052	2,372	5,38	0,031	2,394	4,51	0,026	2,402	4,19	0,027
A1 _{bssd,mod}	2,302	8,18	0,026	2,335	6,86	0,022	2,394	4,51	0,031	2,411	3,83	0,025	2,416	3,63	0,130
A1 _{bdim}	2,213	11,73	0,029	2,243	10,53	0,031	2,306	8,02	0,017	2,332	6,98	0,012	2,341	6,62	0,021
A1 _{bdim,mod}	2,242	10,57	0,028	2,269	9,49	0,016	2,328	7,14	0,038	2,366	5,62	0,025	2,378	5,15	0,017
A2 _{bssd}	2,282	8,97	0,067	2,343	6,54	0,041	2,371	5,42	0,023	2,402	4,19	0,035	2,421	3,43	0,019
A2 _{bssd,mod}	2,301	8,22	0,031	2,351	6,22	0,027	2,392	4,59	0,032	2,423	3,35	0,026	2,427	3,19	0,015
A2 _{bdim}	2,222	11,37	0,036	2,321	7,42	0,030	2,343	6,54	0,028	2,372	5,38	0,021	2,353	6,14	0,014
A2 _{bdim,mod}	2,249	10,29	0,062	2,346	6,42	0,044	2,381	5,03	0,018	2,394	4,51	0,027	2,398	4,35	0,033
A3 _{bssd}	2,237	10,77	0,031	2,273	9,33	0,045	2,301	8,22	0,021	2,332	6,98	0,027	2,385	4,87	0,042
A3 _{bssd,mod}	2,263	9,73	0,030	2,297	8,38	0,032	2,322	7,38	0,017	2,337	6,78	0,024	2,394	4,51	0,011
A3 _{bdim}	2,213	11,73	0,063	2,254	10,09	0,042	2,287	8,78	0,036	2,315	7,66	0,023	2,394	4,51	0,015
A3 _{bdim,mod}	2,269	9,49	0,043	2,287	8,78	0,032	2,311	7,82	0,014	2,362	5,78	0,023	2,401	4,23	0,009
B1 _{bssd}	2,248	10,04	0,080	2,297	8,09	0,006	2,333	6,64	0,026	2,378	4,83	0,023	2,424	2,98	0,014
B1 _{bssd,mod}	2,276	8,92	0,317	2,321	7,11	0,049	2,352	5,88	0,033	2,389	4,41	0,045	2,435	2,54	0,039
B1 _{bdim}	2,186	12,53	0,014	2,222	11,09	0,019	2,251	9,92	0,024	2,282	8,68	0,021	2,320	7,16	0,021
B1 _{bdim,mod}	2,215	11,36	0,056	2,278	8,82	0,033	2,296	8,12	0,027	2,319	7,22	0,032	2,343	6,24	0,029
B2 _{bssd}	2,283	8,63	0,017	2,381	4,71	0,017	2,401	3,92	0,036	2,422	3,09	0,034	2,448	2,03	0,021
B2 _{bssd,mod}	2,310	7,58	0,029	2,376	4,92	0,023	2,406	3,72	0,052	2,445	2,16	0,047	2,489	0,41	0,037
B2 _{bdim}	2,213	11,46	0,062	2,326	6,93	0,016	2,398	4,04	0,031	2,438	2,43	0,023	2,461	1,54	0,018
B2 _{bdim,mod}	2,269	9,20	0,010	2,375	4,98	0,066	2,392	4,28	0,024	2,415	3,34	0,043	2,442	2,28	0,040
B3 _{bssd}	2,267	9,29	0,030	2,325	6,96	0,088	2,366	5,32	0,007	2,416	3,32	0,023	2,472	1,09	0,025
B3 _{bssd,mod}	2,280	8,74	0,036	2,321	7,14	0,031	2,371	5,12	0,016	2,427	2,87	0,033	2,494	0,21	0,019
B3 _{bdim}	2,195	12,15	0,026	2,293	8,25	0,043	2,377	4,88	0,012	2,423	3,04	0,049	2,469	1,19	0,046
B3 _{bdim,mod}	2,250	9,96	0,033	2,319	7,20	0,033	2,368	5,24	0,016	2,418	3,24	0,040	2,469	1,20	0,047
C1 _{bssd}	2,356	4,68	0,026	2,360	4,52	0,098	2,364	4,37	0,031	2,376	3,90	0,025	2,392	3,22	0,019
C1 _{bssd,mod}	2,381	3,69	0,481	2,383	3,59	0,050	2,389	3,36	0,042	2,398	3,00	0,040	2,414	2,36	0,023
C1 _{bdim}	2,327	5,87	0,032	2,351	4,88	0,027	2,400	2,91	0,030	2,411	2,47	0,030	2,416	2,27	0,029
C1 _{bdim,mod}	2,380	3,74	0,070	2,405	2,73	0,015	2,410	2,51	0,047	2,420	2,09	0,019	2,434	1,55	0,046
C2 _{bssd}	2,301	6,90	0,041	2,360	4,52	0,073	2,394	3,16	0,036	2,434	1,55	0,035	2,429	1,72	0,013
C2 _{bssd,mod}	2,330	5,73	0,024	2,379	3,76	0,026	2,406	2,67	0,071	2,435	1,50	0,067	2,430	1,70	0,056
C2 _{bdim}	2,231	9,76	0,017	2,357	4,64	0,014	2,392	3,24	0,026	2,401	2,87	0,019	2,422	2,02	0,018
C2 _{bdim,mod}	2,289	7,38	0,021	2,372	4,03	0,054	2,412	2,43	0,055	2,412	2,44	0,054	2,441	1,25	0,055
C3 _{bssd}	2,270	8,19	0,411	2,320	6,14	0,016	2,386	3,48	0,022	2,420	2,11	0,019	2,439	1,35	0,021
C3 _{bssd,mod}	2,292	7,29	0,385	2,331	5,69	0,127	2,381	3,68	0,016	2,418	2,20	0,042	2,433	1,56	0,002
C3 _{bdim}	2,178	11,88	0,182	2,307	6,67	0,012	2,374	3,96	0,010	2,414	2,35	0,001	2,430	1,70	0,003
C3 _{bdim,mod}	2,243	9,28	0,289	2,342	5,26	0,029	2,393	3,20	0,015	2,418	2,18	0,031	2,431	1,65	0,015

Tab. 19: Gemessene Raumdichten an aus dreiviertel Fallhöhe hergestellten Marshall-Probekörpern nach den in Kapitel 5.2.2 aufgelisteten Messmethoden

dicke soll einen sehr geringen Hohlraumgehalt aufweisen.

Unter der Annahme von 20 Vol.-% im oberen Drittel und 2 Vol.-% im restlichen Probekörper ergibt sich ein mittlerer Hohlraumgehalt von 8 Vol.-% vor der Modifikation. Nach Absägen der hohlraumreichen Phase sollten lediglich 2 Vol.-% im Probekörper vorhanden sein. Diese Annahme wird durch keine Herstellungsmethode und Raumdichtebestimmung belegt und somit wurde in weitergehenden Untersuchungen das Absinkverhalten des Mörtels im 2/5 Korngerüst näher untersucht.

Tabelle 20 gibt einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse an MPK unter Variation der Schlagzahl aus halber Fallhöhe.

Es ist festzustellen, dass auch in diesem Fall der gewünschte Effekt durch Absägen der vermeintlich hohlraumreichen Phase nicht eintritt. Die Hohlraumgehalte vor und nach dem Absägen unterscheiden sich allerdings nur in geringem Maße und bestätigen, dass die Sedimentation der Mörtelphase nicht im erwarteten Ausmaß stattgefunden hat. Diese Schlussfolgerung konnte anhand von Schnittbildern der MPK belegt werden.

Asphalt-Variante / Messmethode	Halbe Fallhöhe														
	20 Schlag			30 Schlag			40 Schlag			50 Schlag			60 Schlag		
	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp	ρ	V	Dp
	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[g/cm³]
A1 _{bsdd}	2,253	10,12	0,019	2,274	9,29	0,014	2,323	7,34	0,017	2,344	6,51	0,020	2,370	5,45	0,037
A1 _{bsdd,mod}	2,280	9,03	0,025	2,292	8,59	0,010	2,344	6,50	0,027	2,354	6,10	0,032	2,386	4,84	0,036
A1 _{bdim}	2,172	13,35	0,029	2,206	12,00	0,012	2,278	9,12	0,015	2,312	7,79	0,026	2,327	7,17	0,029
A1 _{bdim,mod}	2,243	10,53	0,011	2,252	10,18	0,032	2,329	7,09	0,025	2,337	6,80	0,038	2,381	5,02	0,035
A2 _{bsdd}	2,260	9,84	0,042	2,316	7,60	0,041	2,316	7,60	0,041	2,367	5,59	0,093	2,365	5,68	0,020
A2 _{bsdd,mod}	2,288	8,72	0,046	2,347	6,40	0,046	2,347	6,40	0,046	2,419	3,52	0,097	2,373	5,34	0,012
A2 _{bdim}	2,210	11,83	0,082	2,324	7,29	0,033	2,283	8,95	0,089	2,358	5,94	0,107	2,346	6,41	0,036
A2 _{bdim,mod}	2,246	10,42	0,090	2,298	8,34	0,083	2,317	7,58	0,088	2,388	4,74	0,105	2,354	6,10	0,005
A3 _{bsdd}	2,229	11,09	0,023	2,280	9,04	0,021	2,295	8,46	0,033	2,339	6,71	0,023	2,352	6,18	0,075
A3 _{bsdd,mod}	2,239	10,70	0,020	2,295	8,45	0,010	2,309	7,91	0,048	2,345	6,48	0,015	2,350	6,25	0,042
A3 _{bdim}	2,142	14,55	0,019	2,224	11,30	0,024	2,245	10,46	0,036	2,313	7,73	0,024	2,318	7,53	0,092
A3 _{bdim,mod}	2,176	13,22	0,031	2,253	10,12	0,023	2,287	8,77	0,031	2,347	6,38	0,020	2,387	4,77	0,027
B1 _{bsdd}	2,250	9,95	0,007	2,294	8,21	0,022	2,320	7,15	0,003	2,350	5,98	0,020	2,363	5,43	0,016
B1 _{bsdd,mod}	2,267	9,28	0,016	2,311	7,54	0,027	2,343	6,24	0,009	2,368	5,25	0,016	2,375	4,97	0,016
B1 _{bdim}	2,158	13,63	0,030	2,234	10,62	0,015	2,265	9,38	0,073	2,255	9,74	0,174	2,362	5,49	0,127
B1 _{bdim,mod}	2,196	12,11	0,032	2,277	8,89	0,049	2,314	7,39	0,026	2,370	5,16	0,027	2,386	4,52	0,048
B2 _{bsdd}	2,263	9,45	0,010	2,366	5,33	0,019	2,375	4,95	0,072	2,375	4,97	0,028	2,392	4,30	0,025
B2 _{bsdd,mod}	2,293	8,23	0,018	2,345	6,17	0,038	2,388	4,44	0,059	2,384	4,60	0,017	2,394	4,22	0,024
B2 _{bdim}	2,180	12,78	0,029	2,267	9,29	0,014	2,340	6,36	0,095	2,340	6,37	0,104	2,395	4,18	0,091
B2 _{bdim,mod}	2,246	10,11	0,007	2,325	6,97	0,048	2,396	4,12	0,128	2,397	4,08	0,041	2,422	3,09	0,092
B3 _{bsdd}	2,242	10,30	0,081	2,306	7,73	0,035	2,317	7,27	0,029	2,330	6,77	0,022	2,347	6,07	0,016
B3 _{bsdd,mod}	2,252	9,88	0,083	2,317	7,29	0,040	2,341	6,33	0,036	2,355	5,75	0,010	2,357	5,67	0,012
B3 _{bdim}	2,165	13,38	0,078	2,265	9,37	0,081	2,295	8,17	0,047	2,311	7,52	0,035	2,338	6,46	0,034
B3 _{bdim,mod}	2,212	11,49	0,103	2,301	7,91	0,073	2,315	7,35	0,014	2,346	6,14	0,034	2,369	5,22	0,028
C1 _{bsdd}	2,370	4,11	0,045	2,332	5,67	0,059	2,274	8,01	0,010	2,368	4,19	0,017	2,396	3,08	0,016
C1 _{bsdd,mod}	2,394	3,15	0,027	2,364	4,38	0,034	2,311	6,51	0,035	2,386	3,48	0,025	2,409	2,54	0,021
C1 _{bdim}	2,370	4,13	0,089	2,320	6,16	0,111	2,185	11,60	0,035	2,353	4,82	0,024	2,401	2,86	0,068
C1 _{bdim,mod}	2,406	2,68	0,087	2,381	3,67	0,063	2,327	5,87	0,259	2,418	2,17	0,097	2,409	2,54	0,029
C2 _{bsdd}	2,256	8,74	0,047	2,344	5,19	0,100	2,334	5,56	0,076	2,366	4,27	0,029	2,384	3,56	0,012
C2 _{bsdd,mod}	2,280	7,77	0,056	2,369	4,17	0,087	2,336	5,48	0,166	2,392	3,24	0,031	2,406	2,65	0,009
C2 _{bdim}	2,174	12,07	0,029	2,346	5,09	0,154	2,390	3,30	0,067	2,391	3,26	0,073	2,443	1,18	0,039
C2 _{bdim,mod}	2,210	10,59	0,055	2,352	4,84	0,139	2,397	3,02	0,054	2,393	3,20	0,095	2,423	2,00	0,024
C3 _{bsdd}	2,220	10,19	0,049	2,297	7,07	0,079	2,334	5,58	0,114	2,346	5,08	0,042	2,363	4,41	0,067
C3 _{bsdd,mod}	2,250	8,98	0,054	2,318	6,25	0,073	2,355	4,73	0,100	2,367	4,25	0,037	2,374	3,96	0,062
C3 _{bdim}	2,106	14,80	0,088	2,295	7,14	0,023	2,295	7,17	0,132	2,306	6,71	0,071	2,351	4,89	0,166
C3 _{bdim,mod}	2,179	11,84	0,081	2,284	7,62	0,118	2,350	4,94	0,186	2,370	4,14	0,068	2,392	3,24	0,114

Tab. 20: Gemessene Raumdichten an aus halber Fallhöhe hergestellten Marshall-Probekörpern nach den in Kapitel 5.2.2 aufgelisteten Messmethoden

Die Betrachtung der Spannweite der Dreifach-Bestimmung ergibt mit 18 Abweichungen bei 60 Verdichtungsschlägen ein Minimum und kann als nicht zufriedenstellend eingeordnet werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an modifizierten und nicht modifizierten Marshall-Probekörpern können für die untersuchten Mischgutvarianten als nicht zielführend bewertet werden.

Die Modifikationen am Marshall-Verdichtungsgerät, gemäß Kapitel 5.2.2, führten zu keiner signifikanten Verbesserung der Prüfgenaugkeit und es konnten keine praxisäquivalenten Gemischstrukturen an den Probekörpern festgestellt werden.

6.4 Zwischenfazit zur Beurteilung der Mörtelsedimentation unter Berücksichtigung praxisrelevanter Aspekte

Bei der Messung mittels Ausflussviskosimeter konnten diverse Einflussfaktoren auf die Viskosität des Mörtels identifiziert werden. Dabei kann festgehalten werden, dass das Größtkorn, die versteifende Eigenschaft des Füllers und das Verhältnis von Füller zu Sand im Mörtelgemisch die Ausflusszeit beeinflussen.

Bei der Analyse der Bindemittelkomponente konnten ebenfalls Unterschiede bei der Messung festgestellt werden. So konnten deutlich höhere Ausflusszeiten bei der Prüfung von polymermodifizierten Bindemittel festgestellt werden.

Die Messung im Ausflussviskosimeter misst den reinen Ausfluss aus einer Hülse. In der Praxis wird die Sedimentation durch ein Gesteinskörnungsgestüst behindert. Die Polymere im Bindemittel sorgen in diesem Fall für eine gute Vernetzung und führen folglich dazu, dass die Sedimentation der Mörtelphase beeinflusst wird.

Diese grundlegende Problematik wurde im begleitenden Betreuungsausschuss diskutiert. Es wurde festgestellt, dass in der Praxis regelmäßig PmB beim Bau von PMA-Strecken verwendet wird. Diese Bindemittel sind gemäß [AP PMA, 2015] geeignet.

Die Untersuchung an Marshall-Probekörpern unter Verwendung von polymermodifizierten Bindemitteln wurde in der vorhergehenden Projektphase durch-

geführt und in Kapitel 6.3 dokumentiert. Es konnte eindeutig festgestellt werden, dass unter Verwendung von PmB keine 2-Phasen-Struktur im PMA prozesssicher eingestellt werden konnte.

Unter Berücksichtigung dieser ersten Schlussfolgerungen wurde das nachfolgende Untersuchungsprogramm unter Verwendung von Straßenbaubitumen durchgeführt. Bei der Beurteilung des Verformungswiderstandes wurden darüber hinaus praxisrelevante polymermodifizierte Varianten berücksichtigt, um die Erkenntnis zu festigen.

6.5 Optimierung der Probepplattenherstellung

6.5.1 Probenvorbereitung

Für die Untersuchung des Verdichtungsmanagements wurde die Verwendung von drei Sieblinien mit einem Referenzbindemittel festgelegt. Dies erfolgte unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus der Messung der Mörtelsteifigkeit und Untersuchungen am Schnittbild von Marshall-Probekörpern. Die untersuchten Mischgutzusammensetzungen sind in Tabelle 21 dargestellt.

Es wurden im Sinne einer vergleichenden Betrachtung je Mischgutzusammensetzung zwei Asphaltprobepplatten hergestellt, aus welchen, abweichend vom [AP PMA, 2015], jeweils vier Bohrkerne entnommen wurden. Hiermit sollte die Gleichmäßigkeit der Hohlräumverteilung über die Plattenlänge und breite beurteilt werden, um die Prozesssicherheit bei der Probepplattenherstellung zu bewerten.

Die Gleichmäßigkeit des Mischguts für die Asphaltplatten stand dabei zunächst im Vordergrund. Es wurden zwei Probepplatten für die Variante V60/40B1 im Asphaltmischer hergestellt und getrennt in das Walzsektor-Verdichtungsgerät eingefüllt. Um einer ungleichen Verteilung der Mörtelphase in den beiden Probepplatten entgegenzuwirken, wurde das

Variante	Bindemittel B1	Anteil Füller KS1	Anteil fGK NS3	Anteil gGK Diabas
[n]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
V60/40-B1	6,6	16,5	11,0	72,5
V70/30-B1	6,8	18,7	8,0	73,3
V80/20-B1	7,5	20,0	5,0	75,0

Tab. 21: Mischgutzusammensetzung für die Untersuchungen mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät

Mischgut nach Herstellung im Mischer vor der Entnahme noch manuell durchmischt und unmittelbar danach entnommen. Die Mörtelsteifigkeit hat sich gemäß Kapitel 6.2 als wichtig für die Ausprägung der zwei Phasen des PMA herausgestellt. Aufgrund dessen ist der zeitliche Ablauf der Herstellung und somit die Vermeidung von zu starken Temperaturverlusten besonderes zu beachten.

Die Ergebnisse dieses Schrittes, beurteilt anhand der Raumdichte nach Tauchwägung und dem korrelierenden Hohlraumgehalt, sind nachfolgend in Tabelle 22 dargestellt.

Durch diesen Herstellungsablauf ist keine hinreichend homogene Probepplattenherstellung gewährleistet. Als Bewertungskriterium wurde der Mittelwert der Raumdichten herangezogen. Dieser sollte, gemittelt über die vier entnommenen Bohrkerne jeder Platte keine wesentlichen über die Prüftoleranzen des Verfahrens hinausgehenden Abweichungen aufweisen.

Anschließend wurde der Herstellungsprozess genauer betrachtet und wie in Tabelle 23 dargestellt weiter optimiert. Das Mischgut wurde je Asphaltprobeplatte in vier Teilmengen gemischt und anschließend im Trockenschrank gelagert. Nach Heißzwischenlagerung und Nachhomogenisierung der vier Teilmengen wurden die Proben im Walzsektor-Verdichtungsgerät eingebaut und die Asphaltprobeplatte hergestellt.

Dieser Ablauf liefert die nachfolgenden Ergebnisse für zwei unabhängig voneinander hergestellte Asphaltprobeplatten des Mischguts der Variante V60/40–B1 (Tabelle 24).

Es konnte somit festgestellt werden, dass die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Probepplattenherstellung, beurteilt mittels Raumdichte an vier entnommenen Bohrkernen, durch den in Tabelle 23 beschriebenen Herstellungsprozess gewährleistet werden kann.

6.5.2 Variation der Verdichtung

Unter Einbeziehung der in Kapitel 5.2.3 dargestellten theoretischen Überlegungen wurden verschiedene Ansätze zur praxisnahen Simulation des in situ vorherrschenden Verdichtungsmanagement untersucht.

Gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] wird die Vorverdichtung mischgutunabhängig durch eine lineare

Platte	Raum-dichte	Mittelwert	Hohlraum-gehalt	Mittelwert
[n]	[g/cm ³]		[Vol.-%]	
Platte 1	2,385	2,339	4,1	6,3
	2,284		8,4	
	2,344		6,1	
	2,343		6,1	
Platte 2	2,327	2,225	6,7	10,8
	2,183		12,5	
	2,240		10,2	
	2,151		13,8	

Tab. 22: Ergebnis der Raumdichte bei gleichzeitiger Herstellung von Mischgut für zwei Asphaltprobeplatten

Verfahrens-schritt	Ablauf
1	Einwaage der Komponenten für das Asphaltmischgut in vier getrennten Teilmengen
2	Trocknung der Gesteinskörnung bis zur Massenkonstanz und Temperierung des Bindemittels zur Herstellung des Mischguts
3	Herstellung der vier Teilmengen mit anschließender Lagerung im Trockenschrank bei einer Temperatur von 185 °C
4	Entnahme der Probenmengen
5	Kurze manuelle Homogenisierung der Probenmengen
6	Befüllen des Walzsektor-Verdichtungsgerät

Tab. 23: Angepasster Herstellungsablauf für PMA-Mischgut

Bezeichnung	Raum-dichte	Mittelwert	Hohlraum-gehalt	Mittelwert
[n]	[g/cm ³]		[Vol.-%]	
Platte 1	2,279	2,290	8,7	8,3
	2,293		8,1	
	2,302		7,7	
	2,284		8,5	
Platte 2	2,273	2,289	8,9	8,2
	2,304		7,7	
	2,282		8,5	
	2,298		7,8	

Tab. 24: Ergebnisse der Raumdichtebestimmung mit dem angepassten Herstellungsablauf für PMA-Mischgut

Kraftzunahme bis zu einer Höchstlast von 2,6 kN durchgeführt. Im Fall des PMA entspricht die in der [TP Asphalt-StB, Teil 33] als Vorverdichtung definierte Phase der Hauptverdichtung. In situ erfolgt eine Vorverdichtung des PMA-Mischguts mittels Fertigerbohle. Die anschließende Sedimentation der Mörtelphase benötigt keinen Maschineneinsatz. Eine abschließende Glättungsphase bei reduzier-

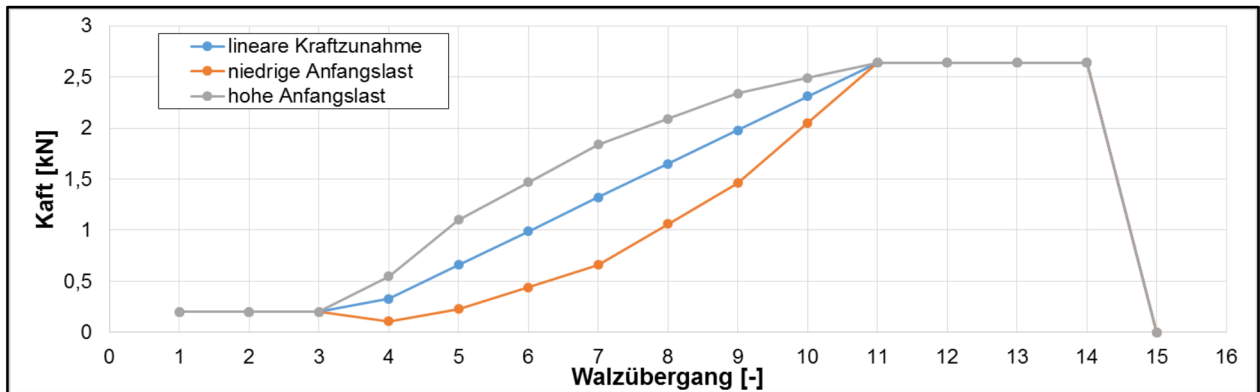


Bild 25: Variation der Verdichtung bei der ersten Verdichtungsphase.

Variante	Maximale spektrale Texturtiefe	Charakteristische Gestaltlänge	Gestaltfaktor	Mittlere Profiltiefe	Mittlere Texturtiefe	dem A_{\max} -Wert entsprechende Wellenlänge
	A_{\max}	gL	g	MPD	MTD	W_{\max}
[n]	[μm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]
Mischgutvariante V60/40–B1						
nAI	311	799	79,8	1,41	1,33	10,0
IKz	288	803	81,7	1,32	1,25	9,8
hAI	311	661	82,3	1,45	1,36	8,0
Mischgutvariante V70/30–B1						
nAI	338	937	82,3	1,52	1,42	11,4
IKz	322	738	82,5	1,37	1,30	8,9
hAI	306	724	81,2	1,43	1,35	8,9
Mischgutvariante V80/20–B1						
nAI	342	851	82,8	1,56	1,45	10,3
IKz	326	833	84,3	1,45	1,36	9,9
hAI	347	777	81,8	1,54	1,43	9,5

Tab. 25: Texturkennwerte unter Variation der Lastzunahme im Walzsektor-Verdichtungsgerät

ter Mischguttemperatur ($< 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) wurde zunächst nicht berücksichtigt.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde die im [AP PMA, 2015] beschriebene erste Verdichtungsphase betrachtet und drei Verdichtungsprogramme in das Walzsektor-Verdichtungsgerät einprogrammiert, um eine unterschiedliche Lastzunahme zu simulieren. Hiermit sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Lastzunahme je Walzübergang auf die Verdichtungsphase des PMA hat. Es wurden folgende Verdichtungsprogramme betrachtet:

- hAI – hohe Anfangslast
- nAI – niedrige Anfangslast
- IKz – lineare Kraftzunahme

Die Kräftesumme am Ende der Verdichtung wurde dabei auf 2,6 kN belassen.

Um den Einfluss der Lastzunahme zu untersuchen wurden die in Tabelle 21 aufgeführten Asphaltvarianten betrachtet. Die Beurteilung der Asphaltprobeplatten erfolgte dabei mittels Texturmessung, Raumdichtebestimmung und Hohlraumverteilung am Schnittbild. Die Ergebnisse der Texturmessungen sind der Tabelle 25 zu entnehmen.

Bild 25 gibt einen Überblick über die drei untersuchten Verdichtungsprogramme.

Die Ergebnisse der Raumdichte und der korrelierenden Hohlraumgehalte sind der Tabelle 26 zu entnehmen. Es wurden je zwei Asphaltprobeplatten herge-

Variante	Platte	Raumdichte	Mittelwert	Hohlraumgehalt	Mittelwert
[n]	[n]	[g/cm ³]		[Vol.-%]	
V60/40–B1 hAl	Platte 1	2,370	2,346	5,0	6,0
	Platte 2	2,322		6,9	
V60/40–B1 IKz	Platte 1	2,289	2,307	8,2	7,5
	Platte 2	2,325		6,8	
V60/40–B1 nAl	Platte 1	2,360	2,342	5,4	6,2
	Platte 2	2,324		6,9	
V70/30–B1 hAl	Platte 1	2,373	2,357	4,7	5,3
	Platte 2	2,341		5,9	
V70/30–B1 IKz	Platte 1	2,335	2,345	6,2	5,8
	Platte 2	2,355		5,4	
V70/30–B1 nAl	Platte 1	2,335	2,342	6,2	6,0
	Platte 2	2,348		5,7	
V80/20–B1 hAl	Platte 1	2,360	2,363	3,5	3,4
	Platte 2	2,365		3,3	
V80/20–B1 IKz	Platte 1	2,325	2,345	5,0	4,2
	Platte 2	2,364		3,3	
V80/20–B1 nAl	Platte 1	2,331	2,336	4,7	4,5
	Platte 2	2,340		4,3	

Tab. 26: Ergebnisse der Raumdichtebestimmung unter Variation der Lastzunahme im Walzsektor-Verdichtungsgerät

stellt, aus denen jeweils vier Bohrkerne entnommen wurden. Die Tabelle wurde um den Mittelwert der Raumdichte über die Asphaltprobepalte erweitert. Dies dient der Untersuchung des zuvor festgelegten Herstellungsablaufs.

Das Bild 26 stellt die Hohlraumverteilung am Schnittbild der Probekörper am Beispiel des Asphaltmischguts V70/30–B1 für alle drei Verdichtungsvarianten dar.

Die Hohlraumverteilung stellte sich, wie in Bild 26 zu erkennen ist, in gewünschter Form ein. Die Bestimmung der Raumdichte mittels Tauchwägung wurde ergänzend an modifizierten Bohrkernen (Abtrennen der hohlraumreichen Oberfläche) bestimmt. Dazu wurden die Bohrkerne mit den in Kapitel 5.2.2 dargestellten Verfahren geprüft.

In Bild 26 ist zu erkennen, dass sich unter Verwendung der Verdichtungsprogramms mit hoher Anfangslast und bei linearer Kraftzunahme die erwartete 2-Phasen-Struktur eingestellt hat. Die niedrige Kraftzunahme stellt lediglich eine Annäherung dar, erweist sich allerdings als Variante mit dem höchsten Hohlraumgehalt. Es ist gelungen durch abtrennen der hohlraumreichen Phase die Messgenau-

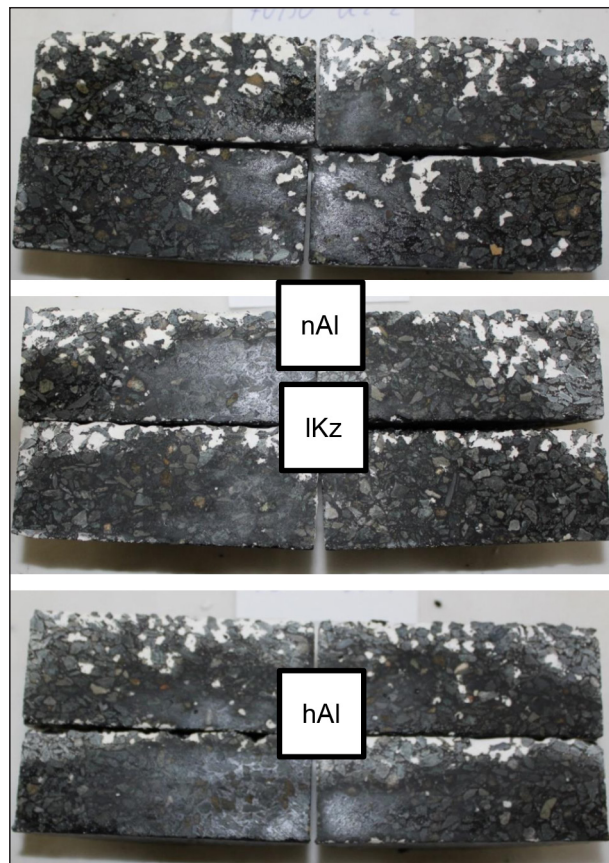


Bild 26: Hohlraumverteilung unter Variation der Lastzunahme (V70/30–B1)

Variante	Platte	Raumdichte	Mittelwert	Hohlraumgehalt	Mittelwert
	[n]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
V70/30–B1 hAl	Platte 1	2,451	2,444	1,6	1,9
		2,446		1,8	
		2,434		2,3	
	Platte 2	2,438	2,429	2,1	2,4
		2,418		2,9	
		2,432		2,3	
V70/30–B1 IKz	Platte 1	2,410	2,407	3,2	3,3
		2,408		3,3	
		2,404		3,5	
	Platte 2	2,418	2,404	2,9	3,5
		2,389		4,1	
		2,405		3,4	
V70/30–B1 nAl	Platte 1	2,384	2,378	4,3	4,5
		2,366		5,0	
		2,385		4,2	
	Platte 2	2,348	2,362	5,7	5,1
		2,381		4,4	
		2,357		5,3	

Tab. 27: Volumetrische Kennwerte der modifizierten Bohrkern unter Variation des Verdichtungsprogramms

igkeit der Raumdichte mittels Tauchwägung am modifizierten Bohrkern zu präzisieren.

Die Ergebnisse der Raumdichtebestimmung sind, exemplarisch am dargestellten Beispiel V70/30–B1, der Tabelle 27 zu entnehmen.

In einem weiteren Schritt sollte die praxisgerechte Verdichtung durch eine zweite, auf die Textur abgestimmte, Verdichtungsphase simuliert werden. Dies erforderte nach Abschluss der ersten Verdichtungsphase eine Abkühlphase, bis die Temperatur des Mischguts auf 130 °C abgesunken ist, um mit der zweiten Verdichtungsphase lediglich das in situ durchgeführte Glätten und somit die Ausbildung der Textur der Oberfläche zu gewährleisten. Während dieser Abkühlphase soll die Hauptverdichtung durch Sedimentation der Mörtelphase ungestört ablaufen können.

In einem ersten Ablauf wurde als Vorverdichtung der Ablauf gemäß [AP PMA, 2015] umgesetzt. Die zweite Phase wurde dabei zeitverzögert nach der Abkühlphase angeschlossen. Dafür wurde kontinuierlich die Oberflächentemperatur mittels Infrarot-Laser-Thermometer gemessen. Die Temperatur des Walzsektors wurde in der zweiten Phase auf 70 °C abgesenkt und der Schlitten auf eine Temperatur von 40 °C eingestellt. Wie im Absatz 5.2.3 beschrie-

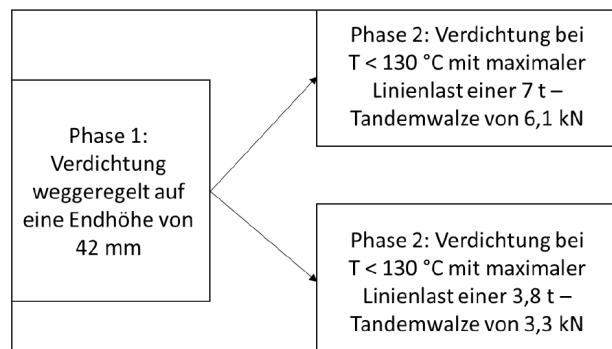


Bild 27: Simulation zweier Verdichtungsphasen zur praxisnahen Abbildung des Verdichtungsmanagement eines PMA

ben, sollte die maximal aufgebrauchte Last auf die in situ aufgebrauchte Linienlast angepasst werden. Um den Einfluss der verschiedenen Walzen zu simulieren, wurde dabei die zweite Verdichtungsphase mit unterschiedlichen Höchstlasten kraftgesteuert bis zum Erreichen der Endhöhe durchgeführt. Die verschiedenen Randbedingungen der Versuche sind in Bild 27 dargestellt. Zusätzlich wurden Probestplatten gemäß dem [AP PMA, 2015] hergestellt und vergleichend in die Auswertung einbezogen.

Die erste Phase spiegelt dabei die von dem Einbau-fertiger aufgebrauchte Verdichtungsarbeit wieder. In der zweiten Phase wird der Einsatz von verschiedenen Walzen, anhand von zwei Tandemwalzen mit unterschiedlichen Linienlasten, simuliert.

Für die Untersuchungen werden die drei Mischgutkonzepte gemäß Tabelle 21 verwendet.

Bei der Auswertung der Asphaltprobeplatten wurde insbesondere die Oberflächentextur betrachtet. Die zweite Verdichtungsphase soll die Gesteinskörnungen an der Oberfläche ausrichten und ein besseres Praxisabbild repräsentieren. Der nachfolgenden Tabelle 28 sind die Ergebnisse der Texturmessungen zu entnehmen.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Texturmessungen wurde die Gleichmäßigkeit der Raumdichte jeder Platte mit jeweils drei Bohrkernen überprüft. Um die Verteilung über den gesamten Probekörper darzustellen sind die Einzelwerte und Mittelwerte der Raumdichtebestimmung nach Tauchwägung an den entnommenen sowie gemäß Kapitel 5.2.2 modifizierten Bohrkernen, getrennt nach der jeweiligen Asphaltprobeplatte, aufgelistet (Tabelle 29). Die Entnahme der Bohrkern erfolgte gemäß [AP PMA, 2015] in drei schräg versetzten Bereichen.

6.5.3 Einfluss von Trenneinlagen

Anhaftendes Bitumen oder Gesteinskörnungen an der Trenneinlage stellen einen möglichen Einfluss auf die Texturkennwerte einer im Labor hergestellten Asphaltprobeplatte dar. Als Trenneinlage wird

gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] eine dünne Silikonfolie verwendet. Mit dem Ziel einer möglichst geringen Beeinflussung der Texturparameter wurden unterschiedliche Trenneinlagen untersucht. Dazu wurden zusätzlich Einlagen aus 80 g/m² Papier, aus PTFE-Folie (0,25 mm) sowie eine dickere Silikonfolie (1 mm) getestet (vgl. Tabelle 30). Der Einfluss der verschiedenen Einlagen auf die Texturparameter, den Hohlraumgehalt, die Hohlraumverteilung am Schnittbild und die mittlere Profiltiefe wurde ermittelt und mit den Ergebnissen der Einlage aus dünnem Silikonpapier verglichen, die als Referenz diente.

Für die Untersuchungen wurde Mischgut aus einer Praxisbaumaßnahme verwendet und mit den in situ gemessenen Werten verglichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30 stellt die gemessenen Werte der Raumdichte nach Tauchwägung und der Mittleren Profiltiefe gegenüber. Hinsichtlich der Raumdichte kann die Referenz als Trenneinlage mit der höchsten Übereinstimmung zur Praxis festgestellt werden. Hinsichtlich der Mittleren Profiltiefe konnte keine praxisnahe Übereinstimmung festgestellt werden. Dies gilt es durch Variation der Verdichtung, gemäß Kapitel 5.2.3, zu optimieren.

Variante	Maximale spektrale Texturtiefe	Charakteristische Gestaltlänge	Gestaltfaktor	Mittlere Profiltiefe	Mittlere Texturtiefe	dem A _{max} -Wert entsprechende Wellenlänge
	A _{max}	gL	g	MPD	MTD	W _{max}
[n]	[µm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]
AP PMA						
V60/40-B1	334	692,79	82,64	1,61	1,35	8,42
V70/30-B1	322	759,96	80,74	1,60	1,33	9,41
V80/20-B1	317	725,98	83,46	1,43	1,26	10,96
Phase 1 + Phase 2.1						
V60/40-B1	329	757,97	81,12	1,49	1,41	9,33
V70/30-B1	305	620,77	81,45	1,44	1,34	7,71
V80/20-B1	323	726,07	80,55	1,48	1,30	9,09
Phase 1 + Phase 2.2						
V60/40-B1	331	713,42	81,62	1,52	1,38	9,01
V70/30-B1	309	693,95	80,90	1,46	1,32	8,23
V80/20-B1	322	731,41	81,23	1,46	1,29	9,04

Tab. 28: Texturkennwerte an PMA-Probepplatten mit Verdichtung gemäß [AP PMA, 2015] und selbstdefiniertem Verdichtungsprogramm

Variante	Herstellung	Bohrkern	Raumdichte	Mittelwert	mod. Raumdichte	Mittelwert
[n]	[-]	[n]	[g/cm ³]		[g/cm ³]	
V60/40-B1	AP PMA	BK 1	2,368	2,368	2,384	2,384
		BK 2	2,374		2,382	
		BK 3	2,361		2,387	
	1 + 2.1	BK 1	2,432	2,435	2,443	2,447
		BK 2	2,435		2,447	
		BK 3	2,437		2,452	
	1 + 2.2	BK 1	2,423	2,426	2,442	2,443
		BK 2	2,431		2,447	
		BK 3	2,424		2,439	
V70/30-B1	AP PMA	BK 1	2,400	2,393	2,398	2,403
		BK 2	2,403		2,403	
		BK 3	2,375		2,407	
	1 + 2.1	BK 1	2,419	2,420	2,434	2,432
		BK 2	2,419		2,428	
		BK 3	2,423		2,433	
	1 + 2.2	BK 1	2,408	2,412	2,421	2,422
		BK 2	2,413		2,419	
		BK 3	2,415		2,427	
V80/20-B1	AP PMA	BK 1	2,325	2,334	2,346	2,351
		BK 2	2,343		2,352	
		BK 3	2,335		2,354	
	1 + 2.1	BK 1	2,333	2,330	2,405	2,403
		BK 2	2,332		2,399	
		BK 3	2,326		2,404	
	1 + 2.2	BK 1	2,327	2,327	2,385	2,390
		BK 2	2,326		2,399	
		BK 3	2,327		2,387	

Tab. 29: Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen unter Variation des Verdichtungsprogramms

Art der Trenneinlage	Raumdichte ρ_{bssd}	Gestaltfaktor g	Maximale spektrale Texturtiefe A_{max}	Mittlere Profiltiefe MPD
	[g/cm ³]	[%]	[μm]	[mm]
dünnes Silikonpapier (Referenz)	2,357	82,3	350	1,34
80 g/m ² Papier	2,335	78,2	390	1,78
PTFE-Folie	2,384	79,7	420	1,77
Silikonmatte	2,421	81,5	290	1,41
Erstprüfung	2,367			-
in situ	-	77,3 bis 79,2	280 bis 410	0,81 bis 1,25

Tab. 30: Ergebnisse der Variation der Trenneinlage

6.6 Verformungswiderstand und Veränderung der Oberflächentextur

6.6.1 Voruntersuchungen zur Auswahl geeigneter Prüfverfahren für PMA

Statische Stempel Eindringtiefe

In einem ersten Schritt wurde die statische Stempel Eindringtiefe an gemäß [AP PMA, 2015] hergestellten Marshall-Probekörper in einer Dreifachbestimmung geprüft. Ergänzend dazu wurden drei weitere mod. MPK₂₀ hergestellt und die hohlraumreiche Phase, gemäß Kapitel 5.2.2, abgesägt. Die Untersuchung der statischen Stempel Eindringtiefe erfolgte anschließend an der dichten Phase des PMA-Probekörpers.

In einem weiteren Schritt wurden nach der Texturmessung Bohrkern aus den Asphaltprobekplatten

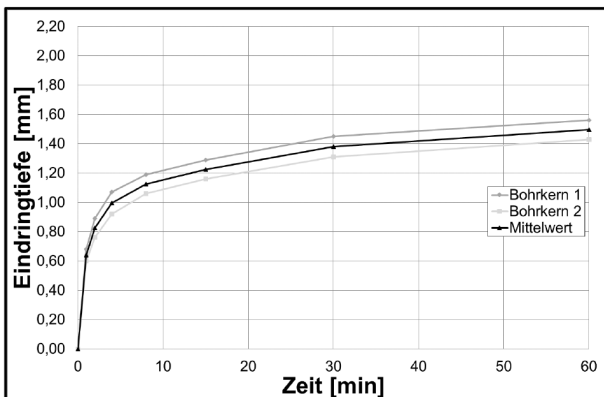


Bild 28: Zeit-Eindringkurve am Beispiel eines ungesägten Bohrkerns – BK 60/40 gemäß [AP PMA, 2015]

entnommen und an diesen die statische Eindringtiefe gemäß [TP-Asphalt-StB, Teil 20], untersucht.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tab. 31 dargestellt.

Die Zeit-Eindringkurve ist beispielhaft für einen Bohrkern 60/40 mit Herstellung gemäß [AP PMA, 2015] dargestellt (Bild 28).

Die Untersuchungen lieferten gute Übereinstimmungen in der Doppelbestimmung. Die nach Abtrennen der Oberfläche nachbehandelten Probeserien zeigten bei allen Varianten eine zum Teil deutliche Verringerung der Eindringtiefen.

Die Ergebnisse der Eindringtiefen fielen dabei insbesondere an den Marshall-Probekörpern sehr niedrig aus. Im Zuge der Hauptuntersuchungen wurde diese Feststellung weitergehend untersucht.

Dynamische Stempel Eindringtiefe

Analog zu der Untersuchung der statischen Eindringtiefe wurden an den mit verschiedenen Verdichtungsprogrammen im Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphaltprobekplatten die Prüfung der dynamischen Stempel Eindringtiefe zur Kontrolle der Eignung der Herstellungsverfahren durchgeführt.

Für die Untersuchung der dynamischen Stempel Eindringtiefe wurden ebenfalls Asphaltprobekplatten verwendet, aus denen je Platte zwei Bohrkern mit 150 mm Durchmesser entnommen wurden.

Variante	Statische Eindringtiefe nach 60 min [mm]			
	am mod. MPK20	am gesägten mod. MPK20	am Bohrkern	am gesägten Bohrkern
MPK 80/20	0,84	0,68	-	-
MPK 70/30	0,80	0,71	-	-
MPK 60/40	0,76	0,63	-	-
BK 80/20 nach AP PMA	-	-	1,77	1,23
BK 70/30 nach AP PMA	-	-	1,26	0,86
BK 60/40 nach AP PMA	-	-	1,50	1,04
BK 80/20 Phasen 1 + 2.1	-	-	2,1	1,12
BK 70/30 Phasen 1 + 2.1	-	-	1,84	1,53
BK 60/40 Phasen 1 + 2.1	-	-	1,81	1,34
BK 80/20 Phasen 1 + 2.2	-	-	1,81	1,13
BK 70/30 Phasen 1 + 2.2	-	-	1,30	0,72
BK 60/40 Phasen 1 + 2.2	-	-	1,75	0,87

Tab. 31: Ergebnisse des statischen Stempel Eindringversuchs an gesägten und ungesägten Probekörpern unter Verwendung von Mischgut mit Bindemittel B1

Die Prüfungen orientierten sich an den Vorschriften der [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1]. Abweichend hiervon wurde die Bohrkernoberseite, welche der hohlraumreichen Phase des PMA entspricht, als Auflastfläche für den Stempel verwendet.

Die angestrebten 2500 Lastzyklen wurden bei den ungesägten Bohrkernen in diesen Versuchen nicht erreicht (Abbruchkriterium: 5 mm), sodass die Ergebnisse rechnerisch extrapoliert wurden.

In Tabelle 32 sind die Prüfergebnisse getrennt nach Mischgut- und Herstellungsvariante aufgelistet.

Eine typische Zeit-Eindringkurve ist in Bild 29 für das Beispiel eines ungesägten Bohrkerns der Variante V70/30B1 dargestellt. Diese zeigt den Verlauf bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums von 5 mm Eindringtiefe.

Variante	Dynamische Stempeleindringtiefe nach 2500 Lastzyklen [mm]	
	am Bohrkern	am abgesägten Bohrkern
BK 80/20 nach AP PMA	6,1	4,1
BK 70/30 nach AP PMA	7,1	4,5
BK 60/40 nach AP PMA	7,2	4,7
BK 80/20 Phasen 1 + 2.1	6,7	3,7
BK 70/30 Phasen 1 + 2.1	6,6	4,4
BK 60/40 Phasen 1 + 2.1	7,1	4,4
BK 80/20 Phasen 1 + 2.2	7,0	4,1
BK 70/30 Phasen 1 + 2.2	6,4	3,9
BK 60/40 Phasen 1 + 2.2	6,9	4,1

Tab. 32: Ergebnis der dynamischen Stempeleindringversuche an gesägten und ungesägten Bohrkernen unter Verwendung von Mischgut mit Bindemittel B1

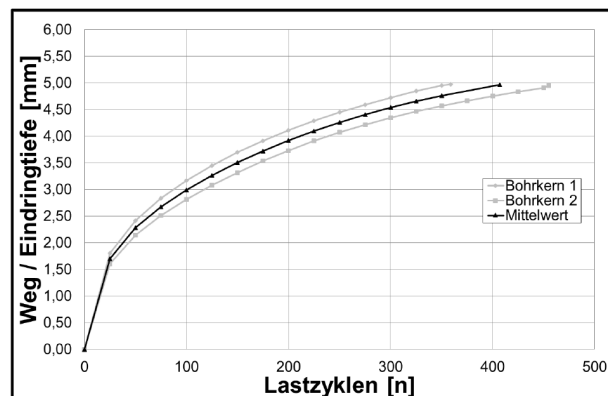


Bild 29: Zeit-Eindringkurve des dynamischen Stempeleindringversuchs am Beispiel eines ungesägten Bohrkerns mit Bindemittel B1– BK 70/30 gemäß [AP PMA, 2015]

Die Untersuchungen fanden zunächst ohne seitliche Abstützung der Probekörper statt. Veränderte Prüfungsrandbedingungen wurden im Rahmen der Hauptuntersuchungen geprüft.

Spurbildungsversuch

Als weitere Kenngröße zur Beurteilung des Verformungswiderstands wurde der Spurbildungsversuch durchgeführt.

Die Untersuchungsreihen unter Variation des Verdichtungsregimes wurden auch im Spurbildungsversuch exemplarisch geprüft. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 33 dargestellt. Diese stellen einen Mittelwert aus einer Doppelbestimmung dar. Die Ergebnisse der Doppelbestimmung lagen dabei in den Prüftoleranzen der [TP Asphalt-StB, Teil 22].

Bild 30 stellt den Verlauf des Spurbildungsversuchs für die geprüften Platten dar.

Aufgrund der hohen Verformungen scheint eine Absenkung der Prüftemperatur auf 50 °C sinnvoll.

Variante	Anzahl Übergangszyklen [n]	Eindringtiefe [mm]
BK 80/20 nach AP PMA	8.092	5,0
BK 70/30 nach AP PMA	4.423	5,0
BK 60/40 nach AP PMA	10.000	5,0
BK 80/20 Phasen 1 + 2.1	5.973	5,0
BK 70/30 Phasen 1 + 2.1	10.000	4,2
BK 60/40 Phasen 1 + 2.1	10.000	4,4

Tab. 33: Ergebnisse des Spurbildungsversuchs unter Variation des Verdichtungsregimes

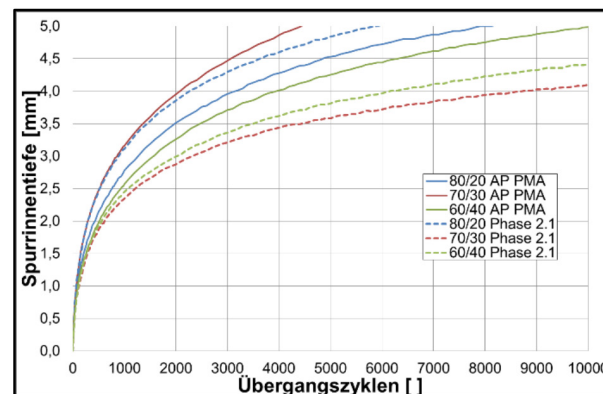


Bild 30: Verlauf der Zunahme der Spurrinnentiefe unter Variation des Verdichtungsprogramms

Variante	Bindemittel	Verhältnis Füller/fGk	Füller	gGk
1	16,9 Vol.-% B1	80/20	KS 1	Diabas
2	16,9 Vol.-% B1	70/30	KS 1	Diabas
3	15,9 Vol.-% B1	70/30	KS 1	Diabas (unterkornbereinigt)
4	15,3 Vol.-% B1	60/40	KS 1	Diabas
5	16,9 Vol.-% B1	70/30	KS 1	Grauwacke
6	16,9 Vol.-% B4	80/20	KS 1	Diabas
7	16,9 Vol.-% B4	80/20	KS 1	Grauwacke
8	16,9 Vol.-% B3	70/30	KS 4	Diabas
9	16,9 Vol.-% B3	70/30	KS 4	Grauwacke
10	16,9 Vol.-% B2	70/30	KS 1	Diabas
11	15,9 Vol.-% B5	70/30	KS 1	Diabas (unterkornbereinigt)
12	16,9 Vol.-% B5	70/30	KS 4	Diabas

Tab. 34: Prüfvarianten zur Ermittlung des Verformungswiderstands unter Variation der Einflussparameter

6.6.2 Hauptuntersuchungen

Für die Ermittlung des Verformungswiderstands im Rahmen der Hauptuntersuchungen wurden nur PMA-Proben herangezogen, an denen die für den PMA charakteristische 2-Phasen-Struktur erkennbar war.

Eine Variation der Einflussfaktoren erfolgte dabei hinsichtlich des verwendeten Bindemittels, des Massenverhältnisses von Füller und feiner Gesteinskörnung, der Füllerart und der Gesteinsart und Sieblinie der groben Gesteinskörnung.

Die Tabelle 34 zeigt die wesentlichen Kennwerte, die die untersuchte Variante unterscheiden. In allen Varianten wurde ein Natursand NS 0/1 mm verwendet.

Bestimmung des Hohlraumgehaltes und der Hohlraumverteilung

In einem ersten Schritt wurden die zwölf in Tabelle 34 aufgelisteten Mischgutzusammensetzungen hinsichtlich einer optimalen Ausprägung der zwei Phasen des PMA optimiert. Dazu wurde die Hohlraumverteilung durch einfärben visualisiert. Dies erfolgte fotooptisch durch Berechnung der Weißanteilverteilung.

Unter Variation des Bindemittelgehaltes für jede Variante hat sich ergeben, dass eine optimale Hohlraumverteilung bei einem Bindemittelvolumen zwischen 15,3 Vol.-% bis 16,9 Vol.-% vorliegt.

Anschließend wurden die Raumdichten der MPK₂₀ durch Tauchwägung an gesägten und ungesägten MPK analysiert. Tabelle 35 stellt die Ergebnisse die-

Var.	Mod. MPK ₂₀			Gesägte mod. MPK ₂₀	
	Rohdichte [g/cm ³]	Raum-dichte [g/cm ³]	Hohlraum-gehalt [Vol.-%]	Raum-dichte [g/cm ³]	Hohlraum-gehalt [Vol.-%]
1	2,469	2,345	5,0	2,375	3,8
2	2,466	2,372	3,8	2,385	3,3
3	2,485	2,312	7,0	2,331	6,2
4	2,494	2,374	4,8	2,391	4,1
5	2,398	2,228	7,2	2,241	6,5
6	2,469	2,343	5,1	2,365	4,2
7	2,401	2,203	8,3	2,222	7,4
8	2,469	2,365	4,2	2,376	3,7
9	2,408	2,200	8,6	2,231	7,3
10	2,466	2,327	5,6	2,336	5,3
11	2,485	2,308	7,1	2,342	5,8
12	2,461	2,228	9,5	2,252	8,5

Tab. 35: Raumdichten an mod. MPK₂₀ und gesägten mod. MPK₂₀

ser Untersuchungen mit den korrelierenden Hohlraumgehalten und den Rohdichten der Asphaltmischgutkonzepte dar.

Vergleichend wurde die Eignung der Verfahren zur Raumdichtebestimmung an Bohrkernen aus Asphaltprobplatten untersucht.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden als Mittelwerte für Raumdichte und Hohlraumgehalt in der Tabelle 36 dokumentiert. Eine Modifikation der Probekörper durch Absägen stellte sich als wenig zielführend hinsichtlich der Präzision dar. Das Bild

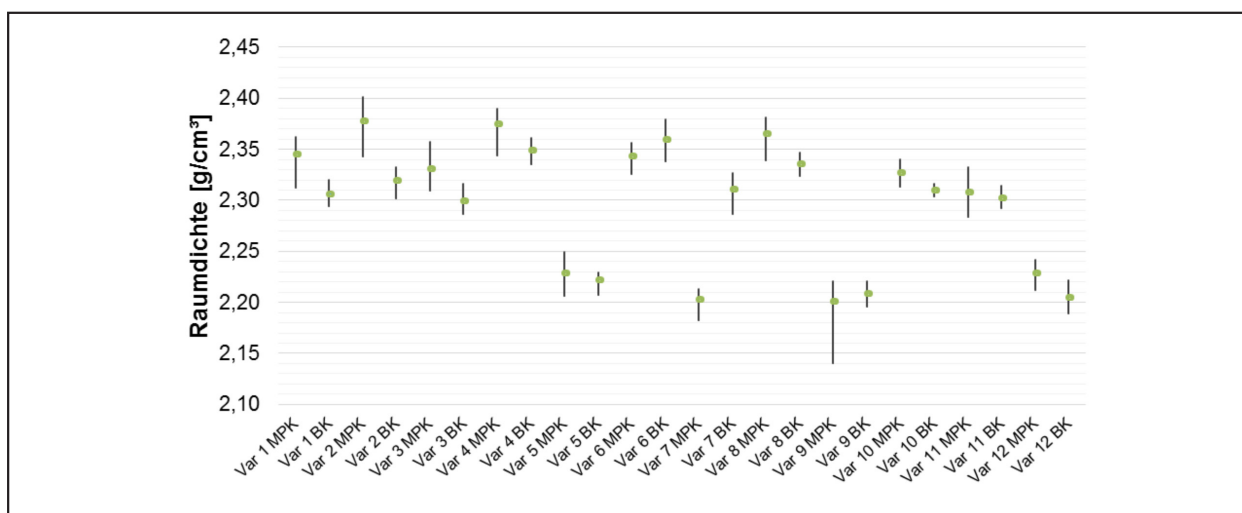


Bild 31: Mittelwerte und Spannweiten der Raumdichtbestimmung an MPK und BK

31 stellt den Mittelwerten und den Spannweiten der Raumdichtbestimmung sechs mod. MPK₂₀ die Messergebnisse an fünf Bohrkernen (jeweils drei mit Ø 100 mm und zwei mit Ø 150 mm) gegenüber.

Textur

Zusätzlich erfolgte die Bestimmung der Textur der Oberfläche der Asphaltprobepplatten mittels Streifenlichtprojektion. Die Prüfung wurde an jeweils zwei Asphaltprobepplatten je Variante durchgeführt und die Ergebnisse der Doppelbestimmung als Mittelwerte in der Tabelle 37 dargestellt.

Dieser Untersuchungsschritt dient der Überprüfung der zu erwartenden lärmreduzierenden Wirkung. Zudem sollte sich beim PMA ein Plateau mit Schluchten mit einer mittleren Rautiefe > 1 mm ausbilden, um eine hinreichende Drainagewirkung zu gewährleisten.

Es ist festzustellen, dass die untersuchten Varianten im akustisch günstigen Bereich hinsichtlich des Gestaltfaktors g und der mittleren Profiltiefe MPD liegen. Zudem lässt sich erkennen, dass mit den ausgewählten zwölf Varianten vergleichbare Texturkennwerte ermittelt werden konnten.

Statische Stempeldringtiefe

Die Ergebnisse an Marshall-Probekörpern zeigten bereits bei den Voruntersuchungen eine schlechte Differenzierbarkeit, sollten jedoch im Zuge der Hauptuntersuchungen durch gezielte Variation der Mischgutparameter weiter analysiert werden.

Der Untersuchungsumfang beinhaltete dabei sowohl die Prüfung von Marshall-Probekörpern in ge-

Var.	Rohdichte [g/cm³]	Bohrkerne		Gesägte Bohrkerne	
		Raum-dichte [g/cm³]	Hohlraum-gehalt [Vol.-%]	Raum-dichte [g/cm³]	Hohlraum-gehalt [Vol.-%]
1	2,469	2,305	6,6	2,372	3,9
2	2,466	2,314	6,2	2,381	3,4
3	2,485	2,299	7,5	2,374	4,5
4	2,494	2,349	5,8	2,396	3,9
5	2,398	2,227	7,1	2,304	3,9
6	2,469	2,359	4,4	2,382	3,5
7	2,401	2,310	3,8	2,336	2,7
8	2,469	2,335	5,4	2,364	4,3
9	2,408	2,209	8,3	2,278	5,4
10	2,466	2,310	6,3	2,341	5,1
11	2,485	2,302	7,4	2,389	3,9
12	2,461	2,204	10,4	2,342	4,8

Tab. 36: Raumdichten an Bohrkernen und gesägten Bohrkernen

sägtem und ungesägtem Zustand wie auch die Prüfung von Bohrkernen. Diese sollten in Anlehnung an die in der Praxis vorliegenden Gegebenheiten im ungesägten Zustand geprüft werden.

Die Tabellen 38 und Tabelle 39 stellen die ermittelten statischen Stempeldringtiefen nach 30 Minuten sowie 60 Minuten und die daraus resultierende Zunahme innerhalb dieser Zeitdifferenz dar.

Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 38 kann geschlossen werden, dass eine Prüfung der Ver-

Var.	Maximale Spektrale Texturtiefe	Charakteristische Gestaltlänge	Gestaltfaktor	Mittlere Profiltiefe	Dem A_{\max} -Wertentsprechende Wellenlänge
	A_{\max}	gL	g	MPD	W_{\max}
[n]	[μm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
1	0,379	876,9	80,92	1,80	10,83
2	0,415	993,7	79,50	1,79	12,50
3	0,409	1113,5	81,69	1,88	13,62
4	0,371	895,6	81,45	1,65	11,00
5	0,344	727,1	81,83	1,58	8,92
6	0,413	941,9	80,67	1,92	11,67
7	0,407	1021,2	81,70	1,92	12,5
8	0,311	978,8	83,81	1,40	11,67
9	0,322	1039,6	81,34	1,49	12,79
10	0,307	817,84	83,89	1,46	9,72
11	0,398	922,14	82,15	1,81	11,22
12	0,315	657,33	82,16	1,58	8,00

Tab. 37: Texturkennwerte an PMA-Probeplatten nach Verdichtung gemäß [AP PMA, 2015]

Statische Stempelleindringtiefe [mm]			
Variante	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme der ET
1	0,80	0,82	0,02
1 gesägt	0,89	0,93	0,04
2	0,61	0,62	0,01
2 gesägt	1,02	1,03	0,01
3	0,53	0,55	0,02
3 gesägt	0,47	0,49	0,02
4	0,54	0,55	0,01
4 gesägt	0,50	0,52	0,02
5	0,58	0,59	0,01
5 gesägt	0,47	0,49	0,02
6	0,60	0,61	0,01
6 gesägt	0,92	0,94	0,02
7	0,47	0,48	0,01
7 gesägt	0,69	0,71	0,02
8	0,47	0,49	0,02
8 gesägt	0,50	0,52	0,02
9	0,65	0,67	0,02
9 gesägt	0,74	0,76	0,02
10	0,67	0,69	0,02
10 gesägt	0,45	0,46	0,01
11	0,51	0,52	0,01
11 gesägt	0,51	0,52	0,01
12	0,54	0,55	0,01
12 gesägt	0,48	0,50	0,02

Tab. 38: Statische Stempelleindringtiefen an Marshall-Probekörpern

Statische Stempelleindringtiefe [mm]			
Variante	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme der ET
1	2,04	2,18	0,14
2	2,35	2,51	0,16
3	1,58	1,68	0,10
4	2,06	2,17	0,11
5	2,63	2,77	0,14
6	1,88	1,95	0,07
7	1,69	1,79	0,10
8	1,04	1,05	0,01
9	1,77	1,94	0,17
10	2,01	2,15	0,14
11	1,96	2,09	0,13
12	1,39	1,64	0,25

Tab. 39 Statische Stempelleindringtiefen an Bohrkernen

formungsbeständigkeit an Marshall-Probekörpern als nicht zielführend anzusehen ist. Die statischen Eindringtiefen sind sowohl im ungesägten wie auch im gesägten Zustand sehr niedrig und liefern darüber hinaus keine Möglichkeit einer differenzierten Betrachtung des Einflusses des variierten Mischguts.

Die Prüfung an Bohrkernen lieferten deutlich höhere Eindringtiefen. Diese liegen in dem Bereich der Anforderungswerte für Gussasphalt.

Variante	Dynamische Stempелеindringtiefe nach 10000 Lastzyklen [mm]
1	2,59
2	2,73
3	1,02
4	2,74
5	2,37
6	2,77
7	2,62
8	1,87
9	1,93
10	3,06
11	4,04
12	2,43

Tab. 40: Dynamische Stempелеindringtiefen an Bohrkernen

Dynamische Stempелеindringtiefe

Basierend auf der Analyse der Voruntersuchung wurde die dynamische Stempелеindringtiefe an Bohrkernen der 12 Varianten unter seitlicher Einspannung in einem Edelstahl-Zylinder geprüft.

Des Weiteren wurde im begleitenden Betreuungsausschuss beschlossen, dass der PMA als Walzasphalt gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] geprüft werden soll. Der Prüfstempel soll dabei weiterhin auf der hohlraumreichen Seite aufgesetzt werden. Dies dient der besseren Vergleichbarkeit zwischen Verformungswiderstand im Labor und in situ.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind nachfolgend in der Tabelle 40 aufgeführt.

Die Ergebnisse der dynamischen Stempелеindringtiefe wurden alle bei einem Abbruchkriterium von 10.000 Lastzyklen gemessen. Eine Spanne der Ergebnisse zwischen 1,02 und 4,04 mm deutet auf eine gute Differenzierbarkeit der Prüfergebnisse hin.

Spurbildung

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Verformungswiderstand im Spurbildungsversuch gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 22] untersucht.

Nach Auswertung der Voruntersuchungen wurden die PMA-Probepplatten in einer Dicke von 40 mm hergestellt und bei einer Temperatur von 50 °C geprüft.

Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche sind in Tabelle 41 unter Angabe der Eindringtiefe beim Erreichen des Abbruchkriteriums von 10.000 Übergangszyklen aufgelistet.

Variante	Anzahl Übergangszyklen [n]	Eindringtiefe [mm]
1	10.000	2,90
2	10.000	2,37
3	10.000	2,39
4	10.000	3,17
5	10.000	2,91
6	10.000	2,90
7	10.000	3,09
8	10.000	2,69
9	10.000	2,51
10	10.000	2,57
11	10.000	3,34
12	10.000	3,07

Tab. 41: Ergebnisse des Spurbildungsversuchs

Die Ergebnisse weisen eine Spanne von 2,37 bis 3,34 mm auf und stellen somit eine mäßig differenzierende Prüfmethode für PMA dar.

6.7 Formulierung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt anhand der Ergebnisse aus Projektphase 1

6.7.1 Probekörperherstellung

Basierend auf den Ergebnissen gemäß Kapitel 6.2 bis Kapitel 6.6 wird nachfolgend eine Prüfsystematik formuliert, welche ausschließlich für Varianten anwendbar ist, die die 2-Phasen-Struktur des PMA gemäß Kapitel 3.1 aufweisen. Polymermodifizierte Bindemittel, die nach [AP PMA, 2015] empfohlene Bindemittel darstellen und regelmäßigen Einsatz in Praxisbaumaßnahmen finden, wurden aufgrund der Erfahrungen und Messungen dieser Forschungsarbeit als kritisch hinsichtlich der Sedimentation des Mörtels eingestuft.

Alle Versuche, mit dem Marschall-Verdichtungsgerät eine experimentelle Bewertungsgrundlage für ein PMA-Mischgut zu schaffen, führten nicht zum Erfolg. Mit einer Probenherstellung im Walzsektor-Verdichtungsgerät wird dagegen eine zielführende Problemlösung gesehen.

Um eine prozesssichere Probenherstellung im Walzsektor-Verdichtungsgerät gewährleisten zu können, wurde in einem ersten Schritt die Probenvorbereitung angepasst. Dafür wurden je Asphaltprobepplatte vier Teilmengen hergestellt und in jeweils eine Viertelfläche der Verdichtungsform des Walzsektor-Verdichtungsgeräts eingefüllt. Der Ablauf der

Verfahrensschritt	Ablauf
1	Einwaage der Komponenten für das Asphaltmischgut in vier getrennten Teilmengen
2	Trocknung der Gesteinskörnung bis zur Massenkonstanz und Temperierung des Bindemittels zur Herstellung des Mischguts
3	Herstellung der vier Teilmengen mit anschließender Lagerung im Trockenschrank bei einer Temperatur von 185 °C
4	Entnahme der Probenmengen
5	Kurze manuelle Homogenisierung der Probenmengen
6	Befüllen des Walzsektor-Verdichtungsgerät

Tab. 42: Angepasster Herstellungsablauf für PMA-Mischgut

Herstellung ist nachfolgend tabellarisch (Tabelle 42) zusammengefasst.

Die nach diesem Ablauf hergestellten Asphaltprobeplatten lieferten gute Ergebnisse hinsichtlich einer homogenen Hohlraumverteilung über die Länge und Breite der Probeplatten. Dies wurde durch Untersuchungen, wie in Kapitel 6.5.2 dargestellt, anhand von vertikalen Schnitten durch die Asphaltprobeplatten validiert. Auch die Betrachtung der Raumdichte an mehreren aus den Probeplatten entnommenen Bohrkernen lieferte hinreichend gleichmäßige Ergebnisse. Dies wurde bereits in den Voruntersuchungen gemäß Kapitel 6.6.1 festgestellt und im Zuge der Hauptuntersuchungen bestätigt.

Hinsichtlich der aufzubringenden Verdichtungsarbeit des Walzsektor-Verdichtungsgeräts wurden mehrere Ansätze verfolgt. Es sollten sowohl die einphasige Verdichtung, welche nach [AP PMA, 2015] derzeit den Stand der Erkenntnisse darstellt, sowie eine auf die Praxis abgestimmte zweiphasige Verdichtung betrachtet werden.

Es konnte festgestellt werden, dass sich die einphasige Verdichtung als geeignet erwiesen hat. Eine Optimierung des Herstellungsablaufs wurde hinsichtlich der Kraftzunahme durchgeführt, bei der sich eine Verdichtung mit hoher Anfangslast als optimal hinsichtlich der Erzielung einer gleichmäßigen Textur und Hohlraumverteilung herausstellte. Die Lastzunahme je Walzübergang (WÜ) wurde dabei gemäß Tabelle 43 in den Prozessablauf des Walzsektor-Verdichtungsgeräts eingearbeitet.

In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde der Einfluss der Trenneinlage bei der Asphaltprobeplat-

Verdichtungsablauf	Anfangsbetonte einphasige Verdichtung
Sektor verfahren	0,2 kN
Oberfläche glätten	3 WÜ mit je 0,20 kN
Kraftzunahme WÜ 1	2 WÜ mit je 0,55 kN
Kraftzunahme WÜ 2	2 WÜ mit je 0,37 kN
Kraftzunahme WÜ 3	2 WÜ mit je 0,25 kN
Kraftzunahme WÜ 4	2 WÜ mit je 0,15 kN
Summe Kraft o. Glättung	2,64 kN

Tab. 43: Lastzunahme der anfangsbetonten, einphasigen Verdichtung für die Probeplattenherstellung

tenherstellung im Walzsektor-Verdichtungsgerät betrachtet.

Hierfür wurde Asphaltmischgut einer PMA-Praxisbaumaßnahme entnommen und unter Verwendung verschiedener Trenneinlagen gemäß [AP PMA, 2015] hergestellt.

In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass weder bei der Baumaßnahme noch unter Verwendung eines dünnen Silikonpapiers Mörtelanreicherungen an der Oberfläche festgestellt werden konnten. Die Verwendung des dünnen Silikonpapiers ist für die Herstellung praxisäquivalenter, homogener Laborproben zu empfehlen.

6.7.2 Mörtelkennwerte

Durch Prüfungen der Mörtelsteifigkeiten wurde eine Datenbasis geschaffen, aus der Kennwerte für Mörtel abgeleitet werden können, die als Grundlage zur Festlegung einer optimalen Mischgutzusammensetzung dienen kann. In einer großen Untersuchungsreihe wurden hierzu diverse Mörtelausflussmessungen unter Variation der Mischgutkomponenten und der Prüfung bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt.

Bei einer Prüfung bei 180 °C und einer Ausflussmenge nach 20 Sekunden von mehr als 110 g ließ sich eine Hohlraumverteilung gemäß des theoretischen Grundgedankens eines PMA im labortechnischen Maßstab prozesssicher einstellen. Dies bestätigte sich sowohl an vertikalen Schnittbildern durch mod. MPK_{20} , wie auch an Asphaltprobeplatten, welche gemäß Tabelle 42 hergestellt wurden.

Die Ergebnisse sind in einem Diagramm zu einem empfohlenen Bereich für die Mörtelviskosität zusammengefasst. Dies bildet eine Ober- und Unter-

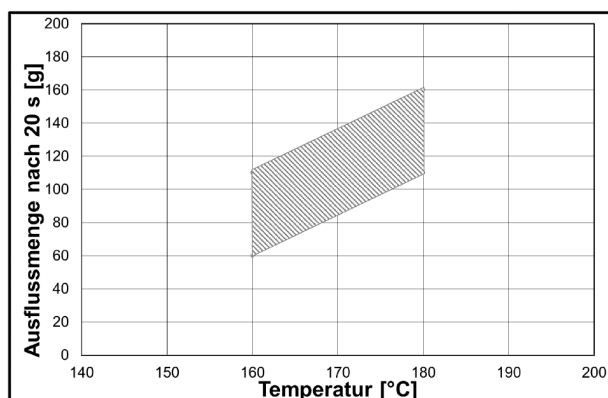


Bild 32: Empfohlener Bereich für eine optimale Mörtelsteifigkeit

grenze bei 160 °C und 180 °C ab, bei welcher eine optimale Sedimentation festgestellt wurde (Bild 32).

6.7.3 Bestimmung des Verformungswiderstands an repräsentativen Probekörpern

Der Verformungswiderstand wurde durch Untersuchungen der statischen Stempeleindringtiefe an mod. MPK₂₀ und an Bohrkernen, der dynamischen Stempeleindringtiefe an Bohrkernen und des Spurbildungsversuchs beurteilt.

An den mod. MPK₂₀ wurden Eindringtiefen von weniger als 0,82 mm ermittelt, während bei der Prüfung der dichten Phase an mod. MPK₂₀ Eindringtiefen von unter 1,03 mm vorliegen. Generell kann festgestellt werden, dass die Eindringtiefen geringer als die Mindestanforderungen an einen Gussasphalt MA5S sind und somit als nicht zweckdienliche Kenngröße interpretiert werden können.

Die Prüfung der statischen Stempeleindringtiefe wurde darüber hinaus an Bohrkernen mit Ø 100 mm durchgeführt. Die Ergebnisse liegen in einem Bereich von 1,05 mm bis 2,77 mm und würden demzufolge im Anforderungsbereich an einen Gussasphalt MA 5 S liegen, was auf einen sehr hohen Widerstand gegen statische Beanspruchungen hindeutet.

Die Ermittlung der dynamischen Stempeleindringtiefe an Bohrkernen lieferte gut differenzierbare Ergebnisse für die zwölf untersuchten Mischgutvarianten, die zudem auf eine insgesamt gute Beständigkeit gegen dynamische Belastungen hindeute.

Geprüft wurde dies mit seitlicher Einspannung der Probekörper in eine Stahlform, welches das Materialverhalten in situ vermutlich besser abbildet. Die

Prüfung fand auf der hohlraumreichen Seite statt, um auch die in situ-Beanspruchung besser abzubilden.

Der Spurbildungsversuch wurde als zweites dynamisches Messverfahren angewendet. Eine Anpassung des Prüfverfahrens auf eine Prüftemperatur von 50 °C war notwendig, weil bei 60 °C keine der zwölf Mischgutvarianten bis zur Überrollung mit 10.000 Lastzyklen geprüft werden konnte.

Die Ergebnisse bei 50 °C liegen in einer Spanne von 2,37 mm bis 3,34 mm und sind somit für die zwölf zielgerichtet optimierten Varianten auf einem ähnlichen Niveau. Eine Differenzierbarkeit der Ergebnisse ist hiermit nur bedingt möglich.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich der mod. MPK₂₀ ausschließlich zur qualitativen Beurteilung der Hohlraumverteilung eignet. Eine Beurteilung des Verformungswiderstands ist hiermit nicht zielführend. Bild 31 zeigt darüber hinaus die Problematik der Vergleichbarkeit zwischen der Bestimmung der Raumdichte an mod. MPK₂₀ und Bohrkernen aus Asphaltprobepplatten auf. Die höhere Prüfpräzision ergab sich dabei für die Ermittlung der Raumdichte durch Tauchwägung an Bohrkernen.

Die gemäß Kapitel 6.7.1 hergestellten Asphaltprobepplatten und daraus entnommenen Bohrkernstellen sich als geeignet zur Bewertung des Hohlraumgehalts, der Hohlraumverteilung und des Verformungswiderstands durch Prüfung der dynamischen Stempeleindringtiefe. Der Spurbildungsversuch kann alternativ als bedingt geeignet eingestuft werden. Als maßgebliches Verfahren zur Beurteilung des Verformungsverhaltens wird, unter Berücksichtigung der dargestellten Ergebnisse, deren Differenzierbarkeit und wirtschaftlicher Aspekte der dynamische Stempeleindringversuch an Bohrkernen (Ø 150 mm) in einer Doppelbestimmung vorgeschlagen.

6.8 Validierung der Prüfsystematik

Die in Kapitel 6.7 formulierte Prüfsystematik sollte an sechs Mischgutvarianten aus der Praxis validiert werden.

Die sechs Mischgutvarianten sind in Tabelle 44 unter Angabe ihrer Zusammensetzung aufgelistet.

Die Varianten S3 und S4 stellen zwei Mischgutkonzepte dar, welche sich im Laufe des Forschungspro-

Var.	Binde- mittel + -anteil	Füller + -anteil	Natur- sand + -anteil	gGk + An- teil
[-]	[M.%]	[M.%]	[M.%]	[M.%]
S3	B1; 7,3	KS1; 20,0	NS1; 5,0	Diabas; 75,0
S4	B5; 8,1	KS1; 18,7	NS1; 8,0	GW; 73,3
A33	B2; 6,8	KS1; 19,0	NS1; 9,0	Diabas; 72,0
A553	B1; 6,8	KS1; 19,0	NS1; 7,5	GW; 73,5
S33	B2; 6,8	KS1; 19,0	NS1; 9,0	Diabas; 72,0
S553	B1; 6,8	KS1; 19,0	NS1; 7,5	GW; 73,5

Tab. 44: Zusammensetzung der sechs Mischgutvarianten zur Validierung

Var.	Ausfluss- menge nach t = 20 s	Anforde- rung	Ausfluss- zeit 25–75 g	Anforde- rung
[-]	[g]	[g]	[s]	[s]
S3	139,6	≥ 110	5,3	< 10
S4	135,3	≥ 110	5,2	< 10

Tab. 45: Mörtelsteifigkeiten der Varianten S3 und S4 bei 180 °C

	Einheit	Variante S3	Variante S4
Tauchwägung	[g/cm³]	2,326	2,219
Präzision	[g/cm³]	0,022	0,010
Hohlraum	[Vol.-%]	6,1	6,9
Ausmessverf.	[g/cm³]	2,286	2,182
Präzision	[g/cm³]	0,037	0,023
Hohlraum	[Vol.-%]	7,7	8,5
modifizierte Tauchwägung	[g/cm³]	2,398	2,250
Präzision	[g/cm³]	0,036	0,012
Hohlraum	[Vol.-%]	3,2	5,6
modifiziertes Ausmessverf.	[g/cm³]	2,368	2,238
Präzision	[g/cm³]	0,049	0,035
Hohlraum	[Vol.-%]	4,4	6,1

Tab. 46: Raumdichten der MPK der Varianten S3 und S4

jekt als optimal hinsichtlich der Ausprägung der zwei Phasen des PMA erwiesen haben.

Die Varianten A33 und A553 bezeichnen die Rückstellproben aus entsprechenden Autobahnbaumaßnahmen. Die Ergebnisse der Untersuchungen an diesen Varianten werden in Kapitel 6.8.2 unter Vergleich mit den Ergebnissen aus der Erstprüfung

dokumentiert. Darüber hinaus wurden die Mischgut-zusammensetzungen der Baumaßnahmen im Labor nachgemischt und als Varianten S33 und S553 mit der definierten Prüfsystematik untersucht, um so auch ein Vergleich zwischen Labor- und Praxis-mischung zu ermöglichen.

6.8.1 Validierung anhand von zwei gemäß der Prüfsystematik optimaler Varianten

Anhand der Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen wurden zwei optimale Mischgutvarianten für die Validierung ausgesucht.

Unter Berücksichtigung der Vorgaben des [AP PMA, 2015] wurden ausschließlich wachsmo-difizierte Bindemittel 50/70 und 30/45 betrachtet. Unter Berücksichtigung eines höheren Verformungswiderstandes in Abhängigkeit von der Bindemittelhärte wurde für die Variante S3 das Bindemittel B1 und für die Variante S4 das Bindemittel B5 verwendet.

Um zusätzlich verschiedene Verhältnisse zwischen Füller und feiner Gesteinskörnung zu berücksichtigen wurde für Variante S3 ein Verhältnis 80/20 und für Variante S4 ein Verhältnis 70/30 ausgewählt.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Messung mittels Ausflussviskosimeter (Tabelle 15) wurden zwei Bindemittelgehalte ermittelt, welche die in Kapitel 6.7.2 definierten Kriterien zur Beurteilung der Mörtelsteifigkeit erfüllen. Die Anforderungen und Kennwerte für die Varianten sind in Tabelle 45 aufgeführt.

Für beide Varianten wurden modifizierte Marshall-Probekörper gemäß [AP PMA, 2015] hergestellt, mit den vier Verfahren der Raumdichtebestimmung geprüft und anschließend unter Betrachtung der Schnittbilder auf deren Hohlraumverteilung analysiert. Die Ergebnisse der Raumdichtebestimmung sind unter Angabe der Präzision der Dreifachbestimmung dargestellt (Tabelle 46).

Für die Bestimmung der Raumdichten der Bohrkern (Tabelle 47) aus den Asphaltprobleplatten wurden nur noch ungeschnittene Proben verwendet. Die Asphaltprobleplatten wurden nach Tabelle 42 und Tabelle 43 hergestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die höhere Messpräzision bei der Prüfung der Raumdichte mit der Tauchwägung erzielt wurde. Die Bestimmung mittels Aus-

	Einheit	Variante S3	Variante S4
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,389	2,222
Präzision	[g/cm ³]	0,003	0,021
Hohlraum	[Vol.-%]	3,6	6,8
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,332	2,201
Präzision	[g/cm ³]	0,027	0,011
Hohlraum	[Vol.-%]	5,9	7,7

Tab. 47: Raumdichten der Bohrkern der Varianten S3 und S4

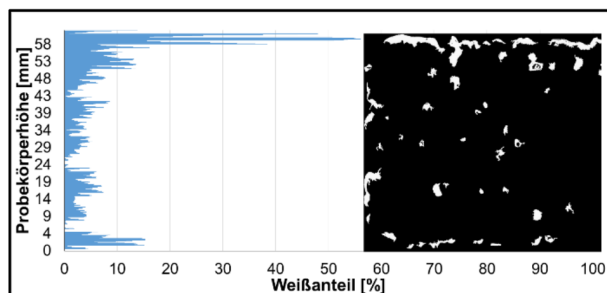


Bild 33: Hohlräumverteilung am Schnittbild des mod. MPK20

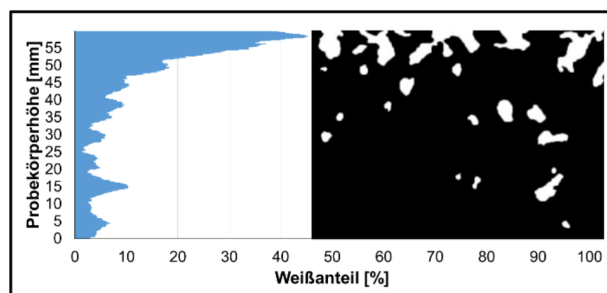


Bild 34: Hohlräumverteilung am Schnittbild einer Asphaltprobeplatte

	Zugängliche Hohlräume MPK [%]	Zugängliche Hohlräume Bohrkern [%]
S3	2,6	3,3
S4	2,5	4,6

Tab. 48: Anteil zugänglicher Hohlräume an MPK und BK

Var.	Maximale Spektrale Texturtiefe	Charakteristische Gestaltlänge	Gestaltfaktor	Mittlere Profiltiefe	Dem A_{\max} -Wert entsprechende Wellenlänge
	A_{\max}	gL	g	MPD	W_{\max}
	[n]	[μm]	[%]	[mm]	[mm]
S3	0,360	751,91	81,89	1,64	9,2
S4	0,323	642,8	80,35	1,52	8,0

Tab. 49: Ergebnisse der Texturmessung auf der Asphaltprobeplatte

messverfahren lieferte in diesem Zusammenhang generell höhere Werte. Die Präzision erfüllt die

Anforderungen des Prüfverfahrens nach [TP Asphalt-StB, Teil 6] und kann somit als Bewertungsgröße für bauvertragliche Regelungen herangezogen werden.

Die vergleichende Betrachtung zwischen mod. MPK₂₀ und Bohrkernen lieferte für Variante S4 eine gute Übereinstimmung. Die Ergebnisse mit der Variante S3 bestätigt dies allerdings nicht.

Die Analyse der Hohlräumverteilung wurde zur Bestätigung der These, dass die Prognose einer Hohlräumverteilung an mod. MPK₂₀ auf Asphaltprobeplatten übertragbar ist, sowohl an mod. MPK₂₀, wie auch durch Längsschnitte durch Asphaltprobeplatten durchgeführt.

Die computergestützte Auswertung ist nachfolgend für Variante S3 für beide Probekörper gegenübergestellt (Bild 33 und Bild 34).

Es wurde festgestellt, dass der MPK sich für eine Prognose der Sedimentation im Korngerüst als geeignet erweist.

Darüber hinaus wurde der Anteil zugänglicher Hohlräume nach [ALP A-StB] bestimmt. Diese Untersuchung wurde an mod. MPK₂₀ und Bohrkernen aus den prozesssicher hergestellten Asphaltprobeplatten durchgeführt (Tabelle 48).

Vor der Bohrkernentnahme wurde an den Asphaltprobeplatten eine Texturmessung mittels Streifenlichtprojektion durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 49 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich eine konkave Oberfläche ausgebildet hat. Dies bestätigt sich durch den Gestaltfaktor von ca. 80 % für beide Varianten mit der Ausprägung von tiefen Schluchten, beurteilt anhand der mittleren Profiltiefe MPD mit Werten größer 1,5 mm.

Darüber hinaus wurden die beiden Varianten in dynamischen Stempeleindringversuchen geprüft, wobei dies mit seitlicher Einspannung und Prüfung auf der hohlraumreichen Seite in Anlehnung an [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] erfolgte (Tabelle 50).

Die Ergebnisse der dynamischen Stempeleindringtiefe liegen nach aktuellem Kenntnisstand auf einem Niveau, das auf einen guten Verformungswider-

Variante	Dynamische Stempel Eindringtiefe nach 10000 Lastzyklen [mm]
S3	2,50
S4	2,75

Tab. 50: Ergebnisse der dynamischen Stempel Eindringversuche

	Einheit	Variante S3	Variante S4
Materialverlust	[kg/m ²]	1,70	1,31

Tab. 51: Kornverlust an Probeplatten in der OVPM

	Einheit	Variante A33	Variante A553
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,374	2,316
Präzision	[g/cm ³]	0,010	0,026
Hohlraum	[Vol.-%]	4,7	4,7
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,372	2,305
Präzision	[g/cm ³]	0,027	0,018
Hohlraum	[Vol.-%]	4,8	5,2
modifizierte Tauchwägung	[g/cm ³]	2,373	2,336
Präzision	[g/cm ³]	0,019	0,015
Hohlraum	[Vol.-%]	4,7	3,9
modifiziertes Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,361	2,324
Präzision	[g/cm ³]	0,052	0,031
Hohlraum	[Vol.-%]	5,2	4,4

Tab. 52: Raumdichten der MPK der Varianten A33 und A553

	Einheit	Variante S33	Variante S553
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,363	2,279
Präzision	[g/cm ³]	0,018	0,013
Hohlraum	[Vol.-%]	5,1	6,3
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,359	2,283
Präzision	[g/cm ³]	0,008	0,012
Hohlraum	[Vol.-%]	5,3	6,1
modifizierte Tauchwägung	[g/cm ³]	2,397	2,320
Präzision	[g/cm ³]	0,010	0,027
Hohlraum	[Vol.-%]	3,8	4,6
modifiziertes Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,377	2,300
Präzision	[g/cm ³]	0,053	0,030
Hohlraum	[Vol.-%]	4,6	5,4

Tab. 53: Raumdichten der MPK der Varianten S33 und S553

stand hindeutet. Darüber hinaus bestätigen die gewonnenen Ergebnisse, dass bei zielgerichteter Ausprägung der 2-Phasen-Struktur weiterhin ein guter Verformungswiderstand vorhanden ist.

Der Kornverlust der beiden Varianten wurde durch die Untersuchung mit der Oberflächenverschleißprüfmaschine (OVPM) bestimmt (Tabelle 51).

Die Untersuchungsergebnisse deuten nach bisherigem Kenntnisstand auf eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber Schub- und Scherbeanspruchungen hin.

6.8.2 Validierung durch Vergleich der Praxis- und Laborproben

Für den Vergleich zwischen Praxis und Labor wurden bei Bauausführung Mischgutproben entnommen. Darüber hinaus wurden anhand der Erstprüfung die Mischgutzusammensetzungen im Labor nachgemischt.

Von den vier Varianten wurden mod. MPK₂₀ hergestellt und mit den vier Verfahren der Raumdichtebestimmung geprüft (Tabelle 52 bis Tabelle 55). Ergänzend sind die Raumdichten aus den Erstprüfungen in Tabelle 56 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Raumdichtebestimmung bestätigen, dass die Tauchwägung sowohl am mod. MPK₂₀, wie auch an Bohrkernen aus Asphaltprobeplatten die geforderte Präzision der [TP Asphalt-StB, Teil 6] erfüllt. Die Modifikation der mod. MPK₂₀ durch Absägen der hohlraumreichen Phase wurde auch im Zuge der Untersuchung dieser vier Varianten als nicht zielführend festgestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zwischen Praxisproben und laborgemischten Proben zeigen eine gute Vergleichbarkeit auf. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Raumdichtebestimmung an mod. MPK₂₀ gut mit denen der Bohrkernuntersuchungen vergleichbar.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Erstprüfungen kann festgestellt werden, dass die Untersuchungsergebnisse gut reproduzierbar sind.

Analog zu den Untersuchungen der zwei gemäß Kapitel 6.8.1 geprüften Varianten wurde die Hohlraumverteilung mittels fotooptischer Auswertung betrachtet. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Hohlraumverteilungen an mod. MPK₂₀ und an Längsschnitten durch Asphaltprobeplatten am Beispiel des Mischgutes der A553 visuell dargestellt (Bild 35 bis Bild 36).

	Einheit	Variante A33	Variante A553
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,373	2,310
Präzision	[g/cm ³]	0,006	0,018
Hohlraum	[Vol.-%]	4,7	5,0
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,371	2,302
Präzision	[g/cm ³]	0,035	0,022
Hohlraum	[Vol.-%]	4,8	5,3

Tab. 54: Raumdichten der Bohrkerne der Varianten A33 und A553

	Einheit	Variante S33	Variante S553
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,370	2,279
Präzision	[g/cm ³]	0,005	0,022
Hohlraum	[Vol.-%]	4,9	6,2
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,380	2,307
Präzision	[g/cm ³]	0,024	0,041
Hohlraum	[Vol.-%]	4,5	5,1

Tab. 55: Raumdichten der Bohrkerne der Varianten S33 und S553

	Einheit	Variante A33	Variante A553
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,376	2,293
Präzision	[g/cm ³]	n.a.	n.a.
Hohlraum	[Vol.-%]	6,0	6,1

Tab. 56: Raumdichten der MPK aus den Erstprüfungen für die Baumaßnahme A33 und A553

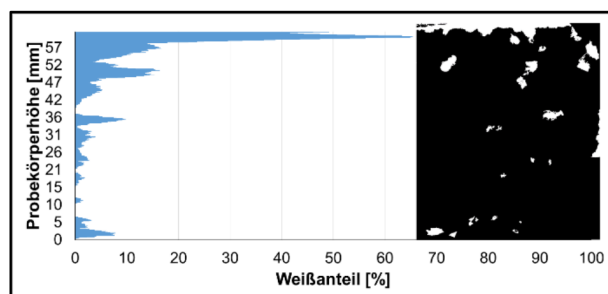


Bild 35: Hohlraumverteilung am Schnittbild des mod. MPK20 aus Asphaltmischgut der Variante A553

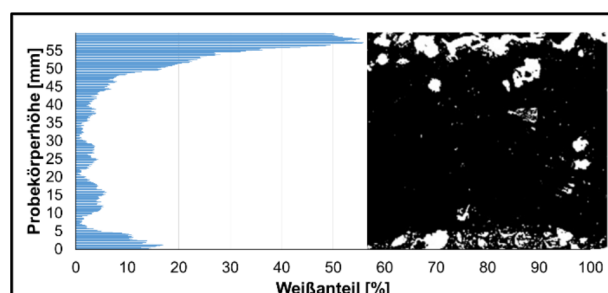


Bild 36: Hohlraumverteilung am Schnittbild einer Asphaltprobeplatte aus Mischgut der Variante A553

Var.	Maximale Spektrale Texturtiefe	Charakteristische Gestaltlänge	Gestaltfaktor	Mittlere Profiltiefe	Dem A _{max} -Wert entsprechende Wellenlänge
	A _{max}	gL	g	MPD	W _{max}
[n]	[µm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
A33	0,348	808,96	78,88	1,58	10,3
S33	0,351	865,43	82,45	1,61	10,5
A553	0,304	708,61	81,72	1,34	8,7
S553	0,309	772,52	80,00	1,49	9,7

Tab. 57: Ergebnisse der Texturmessung auf den Asphaltprobeplatten

	Zugängliche Hohlräume MPK [%]	Zugängliche Hohlräume Bohrkern [%]
A33	1,9	3,6
S33	1,8	2,4
A553	3,0	3,1
S553	7,3	6,6

Tab. 58: Anteil zugänglicher Hohlräume an MPK und BK

Variante	Dynamische Stempel Eindringtiefe nach 10000 Lastzyklen [mm]
A33	2,44
S33	1,93
A553	2,20
S553	1,98

Tab. 59: Ergebnisse der Dynamischen Stempelversuche

	Einheit	Variante A33	Variante A553
Materialverlust	[kg/m ²]	0,12	0,53

Tab. 60: OVPM – Kornverlust an Probeplatten, Praxismischgut

	Einheit	Variante S33	Variante S553
Materialverlust	[kg/m ²]	0,28	0,85

Tab. 61: OVPM – Kornverlust an Probeplatten, Labormischgut

	Einheit	Variante A33	Variante A553
Materialverlust	[kg/m ²]	0,10	n.a.

Tab. 62: Angaben zum Kornverlust aus Erstprüfung

Die Ergebnisse der fotooptischen Auswertung bestätigen, dass das Schnittbild am mod. MPK20 geeignet zur Beurteilung der Mörtelviskosität im Gesteinsgerüst ist.

An den Asphaltprobepplatten wurde darüber hinaus eine Texturmessung mittels Streifenlichtprojektion durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 57 aufgeführt.

Die Ergebnisse (Tabelle 57) deuten auf gute läroptimierte Eigenschaften hin. Der Gestaltfaktor im Wertebereich um 80 % und die mittlere Profiltiefe mit etwa 1,5 mm bestätigen die zuvor ermittelten Ergebnisse.

Der Anteil zugänglicher Hohlräume wurde an Bohrkernen und Marshall-Probekörpern bestimmt (Tabelle 58).

Der Vergleich des Verformungsverhaltens im dynamischen Stempel Eindringversuch zwischen Praxisproben und laborgemischten Proben zeigt die Tabelle 59.

Die Asphaltprobepplattenherstellung im Labor war für beide Varianten identisch.

Der Verformungswiderstand der vier untersuchten Varianten liegt nach aktuellem Kenntnisstand in einem guten Bereich. Der Vergleich zeigt, dass im Labor hergestellte Proben einen etwas besseren Verformungswiderstand aufweisen.

Der Kornverlust der vier Mischgutproben mittels OVPM-Prüfung ist in Tabelle 60 und Tabelle 61 aufgeführt.

Die Erstprüfung für das Mischgut der A33 enthielt u.a. eine Angabe zum Kornverlust in der OVPM (siehe Tabelle 62)

Die Bewertung des Materialverlusts an den Varianten A33 und S33 kann nach dem bisherigen Kenntnisstand als sehr gering empfindlich gegenüber Schub- und Scherbeanspruchungen zugeordnet werden. Die Varianten A553 und S553 sind mit einer geringen Empfindlichkeit zu beurteilen.

7 Versuchsstrecke

Im letzten Bearbeitungsschritt wurde die entwickelte Prüfsystematik anhand einer Praxisbaumaßnahme validiert.

Die Mischgutzusammensetzung der Praxisbaumaßnahme ist in Tabelle 63 aufgeführt.

Masse [M.-%]	Bezeichnung	Lieferkörnung
22,0	Kalksteinmehl	Füller
7,0	Natursand	Natursand 0/1
71,0	Diabas	GC90/10 2/5
6,9	B1	Bindemittel

Tab. 63: Mischgutzusammensetzung der Praxisbaumaßnahme

Eigenschaft	Einheit	Kenngroße
Eindringtiefe nach 30 Min am mod. MPK ₂₀	[mm]	1,2
Zunahme nach weiteren 30 Minuten	[mm]	0,1
Raumdicke am MPK	[g/cm ³]	2,369
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	5,2

Tab. 64: Weitere Asphaltkennwerte gemäß der Erstprüfung

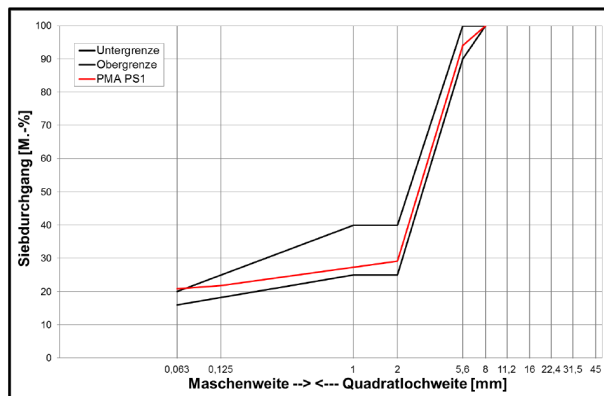


Bild 37: Sieblinie des extrahierten Gesteinsgerüsts von Baumaßnahme PS1

	Einheit	Variante PS1
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,393
Präzision	[g/cm ³]	0,024
Hohlraum	[Vol.-%]	4,4
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,363
Präzision	[g/cm ³]	0,030
Hohlraum	[Vol.-%]	5,6
modifizierte Tauchwägung	[g/cm ³]	2,396
Präzision	[g/cm ³]	0,012
Hohlraum	[Vol.-%]	4,2
modifiziertes Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,377
Präzision	[g/cm ³]	0,009
Hohlraum	[Vol.-%]	5,0

Tab. 65: Raumdichten der MPK

Weitere Eigenschaften des Asphaltmischgutes sind in Tabelle 64 dokumentiert.

Es lagen trockene, windstille und sonnige Wetterbedingungen vor. Nach bisherigem Kenntnisstand

ist die Verweildauer des Mischgutes im Transportfahrzeug von hoher Bedeutung für die gleichmäßige Schichtstruktur. Die Entfernung des Mischwerks zur Baustelle war dabei sehr gering, so dass die Empfehlungen nach [AP PMA, 2015] gewährleistet waren.

Während des Einbauprozesses wurden nur einzelne Schadensbilder in Form von Mörtelanreicherungen an der Oberfläche dokumentiert.

Die Validierung der Prüfsystematik anhand von auf der Baustelle entnommenen Mischgutproben wurde analog zu Kapitel 6.8 durchgeführt.

Nach Extraktion einer repräsentativen Mischgutprobe wurde ein Bindemittelgehalt von 6,9 M.-% festgestellt. Die Korngrößenverteilung der extrahierten Gesteinskörnung ist in Bild 37 dargestellt.

Anschließend wurden mod. MPK₂₀ hergestellt und mit den vier Verfahren der Raumdichtebestimmung bewertet (Tabelle 65).

Ergänzend wurden Bohrkerne aus Asphaltprobeplatten entnommen und mit den zwei Verfahren der Raumdichtebestimmung geprüft (Tabelle 66).

Die Prüftoleranzen lagen alle in den geltenden Anforderungen mit einer Abweichung der Werte $\leq 0,3 \text{ g/cm}^3$. Die höchste Präzision der Prüfmethode wies dabei die Prüfung der Tauchwägung an Bohrkerne auf. Verglichen mit der Erstprüfung konnte eine gute Vergleichbarkeit festgestellt werden.

	Einheit	Variante PS1
Tauchwägung	[g/cm ³]	2,414
Präzision	[g/cm ³]	0,004
Hohlraum	[Vol.-%]	3,5
Ausmessverf.	[g/cm ³]	2,408
Präzision	[g/cm ³]	0,010
Hohlraum	[Vol.-%]	3,8

Tab. 66: Raumdichten der Bohrkerne aus Asphaltprobeplatten

Var.	Maximale Spektrale Texturtiefe	Charakteristische Gestaltlänge	Gestaltfaktor	Mittlere Profiltiefe	Dem A _{max} -Wert entsprechende Wellenlänge
	A _{max}	gL	g	MPD	W _{max}
	[n]	[µm]	[mm]	[mm]	[mm]
PS1	0,384	792,38	79,81	1,73	11,96

Tab. 67: Ergebnisse der Texturmessung

Die Hohlraumverteilung wurde durch vertikale Schnittbilder sowohl an mod. MPK₂₀, wie auch an Bohrkerne durch eine fotooptische Analyse ausgewertet. Der Vergleich wird exemplarisch an einem Probekörper je Herstellungsverfahren durch die Bilder 38 und 39 dargestellt.

Die Textur wurde durch Streifenlichtprojektion auf den Asphaltprobeplatten bestimmt (Tabelle 67).

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen konnte eine vergleichbare Textur anhand des Gestaltfaktors g und der mittleren Profiltiefe MPD nachgewiesen werden.

Der Anteil zugänglicher Hohlräume wurde in Anlehnung an [ALP A-StB] bestimmt (Tabelle 68).

	Zugängliche Hohlräume MPK [%]	Zugängliche Hohlräume Bohrkern [%]
PS1	2,6	2,4

Tab. 68: Anteil zugänglicher Hohlräume an MPK und BK

Variante	Dynamische Stempelleindringtiefe nach 10000 Lastzyklen [mm]
PS1	3,26

Tab. 69: Ergebnis des Dynamischen Stempelleindringversuchs

	Einheit	Variante PS1
Materialverlust	[kg/m ²]	0,76

Tab. 70: OVPM – Kornverlust an Probeplatten, Versuchsstrecke

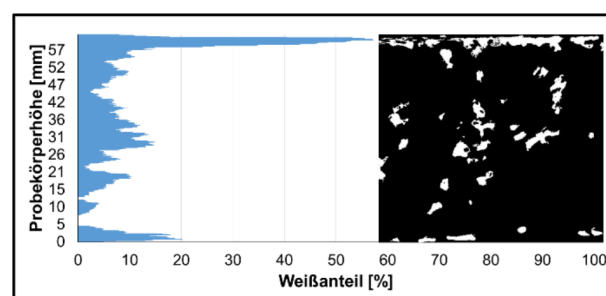


Bild 38: Hohlraumverteilung am Schnittbild des mod. MPK₂₀ aus Asphaltmischgut der Praxisvariante PS1

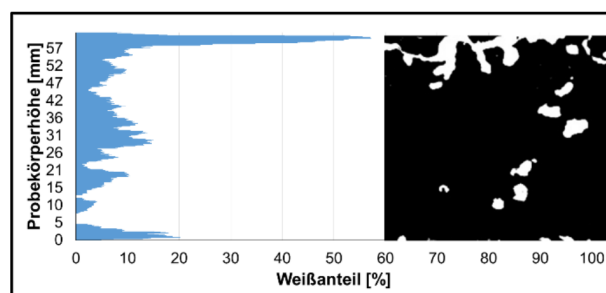


Bild 39: Hohlraumverteilung am Schnittbild einer Asphaltprobeplatte aus Mischgut der Praxisvariante PS1

Der Verformungswiderstand wurde im dynamischen Stempelerindringversuch an seitlich eingespannten Bohrkernen untersucht. Das Ergebnis ist in Tabelle 69 aufgeführt.

Der Verformungswiderstand der Praxisstrecke liegt nach derzeitigem Kenntnisstand auf einem mittleren und im Vergleich zu den übrigen Mischgutvarianten höheren Niveau.

Der Kornverlust wurde durch die Untersuchung mit der Oberflächenverschleißprüfmaschine (OVPM) geprüft (Tabelle 70).

Der Materialverlust der Asphaltprobeplatten belegt einen guten Widerstand gegen Schub- und Scherbeanspruchungen des geprüften Praxismischguts.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Entwicklung einer Prüfsystematik zur prozesssicheren Herstellung und Ansprache des PMA-Mischguts im Labor grundsätzlich möglich ist.

Durch gezielte Untersuchung der Mörtelkomponente konnte eine Kenngröße der Mörtelsteifigkeit analysiert werden, welche Auskunft über die zu erwartende Sedimentation und die damit selbstverdichtende Wirkung gibt. Kenngröße hierfür ist die Ausflussmenge nach 20 Sekunden, die im Ausflussviskosimeter bei einer Prüftemperatur von 160 °C und 180 °C zu ermitteln ist.

Die Mörtelsteifigkeit wurde unter Verwendung verschiedener Bindemittel, Füller/Sand-Verhältnisse, versteifender Eigenschaften der Füller sowie des Einflusses der Provenienz und des Größtkorns der verwendeten feinen Gesteinskörnung analysiert.

Es konnte gezeigt werden, dass eine gute Fließfähigkeit der Mörtelkomponente vorliegt, wenn bei einer Prüftemperatur von 160 °C und der Messung nach 20 Sekunden eine Mörtelmenge zwischen 60 g und 110 g ausgeflossen ist. Es wurde ein Empfehlungsbereich für eine optimale Mörtelsteifigkeit im Temperaturbereich von 160 °C bis 180 °C definiert.

Die umfangreichen Untersuchungen von Marshall-Probekörpern haben ergeben, dass diese lediglich zur Optimierung der Mischgutzusammen-

setzung durch visuelle Bewertung der Ausprägung der zwei Phasen des PMA anhand von vertikalen Schnittbildern der mod. MPK₂₀ herangezogen werden können.

Eine wichtige Erkenntnis, welche im Zuge der Prüfung der Mörtelsteifigkeit und der Sedimentation der Mörtelphase gewonnen wurde, zielt auf den Einsatz von polymermodifizierten Bindemittel ab. Polymermodifizierte Bindemittel, auch solche mit zusätzlichen viskositätsverändernden Zusätzen, verhindern aufgrund der vergleichsweise hohen Viskosität die materialtypische zweiphasige Schichtstruktur. Die Ausprägung der zwei Phasen unter Verwendung von PmB konnte lediglich durch ein hohes (zu hohes) Bindemittelvolumen erzielt werden.

Als bewertungsrelevante Probekörper erwiesen sich Bohrkern aus Asphaltprobeplatten. Hierzu wurde ein Herstellungsablauf entwickelt, welcher es ermöglicht eine homogene Ausprägung der zwei Phasen des PMA über die gesamte Fläche des Probekörpers zu gewährleisten. Dafür werden je Probeplatte vier Teilmengen separat gemischt und anschließend durch Einfüllen in volumetrisch getrennte Bereiche des Walzsektor-Verdichtungsgerätes eingebracht.

Für die Ermittlung des maßgebenden Prüfverfahrens wurden neben der Ermittlung der statischen Stempelerindringtiefe an mod. MPK₂₀ und Bohrkernen zwei dynamische Prüfverfahren untersucht. Eine Anpassung beider Verfahren zur zielgerichteten Untersuchung des PMA war notwendig. Der Spurbildungsversuch wurde abweichend zu der Prüfvorschrift [TP Asphalt-StB, Teil 22] bei einer Prüftemperatur von 50 °C durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung konnten dabei als brauchbar differenzierend festgestellt werden. Für die Untersuchung der dynamischen Stempelerindringtiefe wurden die Bohrkern mit Ø 150 mm in einen Edelstahl-Zylinder eingespannt und anschließend auf der hohlraumreichen Seite geprüft. Diese Untersuchung lieferte auch eine gute Differenzierbarkeit.

Weiter konnte festgestellt werden, dass bei zielgerichteter Optimierung des PMA-Mischguts auf die Grundidee der 2-Phasen-Struktur eine gute Homogenität der Probekörper durch den definierten Herstellungsablauf der Asphaltprobeplatten gewährleistet werden konnte. Die Bestimmung des Hohlraumgehaltes und der Raumdichte erfüllten da-

bei die Anforderungen an die Präzision der [TP Asphalt-StB, Teil 6]. Dies konnte bei den untersuchten Varianten zum Verformungswiderstand (Bild 36 – drei Sieblinien mit fünf verschiedenen Bindemitteln) und den sieben Varianten zur Validierung der Prüf-systematik (Tabelle 47, Tabelle 56 und Tabelle 57) bestätigt werden.

Unter Berücksichtigung der einbaubegleitenden Erfahrungen und der Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit ist festzustellen, dass die im Labor ermittelten Ergebnisse nur bedingt auf die Praxis übertragbar sind.

Für die in jüngster Vergangenheit ausgeführten Baumaßnahmen mit PMA wurden teilweise Mörtelkonzepte verwendet, die die bautechnische Performance in situ positiv beeinflussen und einer Entmischung auf dem Lkw entgegenwirken sollten (Mörtel mit PmB oder Faserstoffen). Dies hatte zur Folge, dass häufig keine zweiphasige Schichtstruktur, sondern eine zufällige Hohlraumverteilung entstand. Die Oberflächentexturen solcher Schichten waren aber homogen und immer noch akustisch wirksam. Solche Mischgutkonzepte lassen sich nicht mit dem derzeitigen AP PMA beschreiben und waren daher auch nicht Bestandteil des Forschungsprojektes. Die hohe Bedeutung lärmtechnisch wirksamer Bauweisen sollte den Anlass geben, über eine Umorientierung der PMA-Bauweise (entmischungsresistent mit möglichst gleichmäßiger Hohlraumverteilung) nachzudenken.

Die für die Ausbildung der zweiphasigen Schichtstruktur notwendige Mörtelviskosität führt hingegen dazu, dass unter typischen bauleistungsbedingten Randbedingungen eine Mörtelsedimentation vor dem Einbau des Mischgutes nicht ausgeschlossen werden kann. Findet auf der Baustelle vor der Zuführung des Mischgutes in die Einbaubohle eine Nachhomogenisierung statt (Beschicker mit Mischaggregat), dann könnte auch bei der baupraktischen Umsetzung die notwendige Gleichmäßigkeit der zweiphasigen Schichtstrukturen erreicht werden.

In weiteren Untersuchungen sollten demnach die notwendigen Einbaurandbedingungen festgelegt werden, mit denen eine über die Fläche gleichmäßige zweiphasige Hohlraumstruktur erreicht wird.

Literatur

- ALP A-StB, Teil 1: Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt; Teil 1: Bestimmung der zugänglichen Hohlräume in Asphalt mit dem Hohlraummeßgerät; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Köln, Ausgabe 1999
- AP PMA, 2015: Arbeitspapier für die Ausführung von Asphaltdeckschichten aus PMA, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV); Köln, Ausgabe 2015
- BECKENBAUER, ET. AL., 2002: BECKENBAUER, T., SPIEGLER, P., VAN BOKLAND, G., KUIJPERS, A., HUSCHEK, S., STÜTZE, T., HEERKENS, J.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.; Heft 847, 2002
- BECKENBAUER, 2008: BECKENBAUER, T.; Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Geräuschenstehung, Wirkmechanismen und akustische Wirkung unter dem Einfluss von Bautechnik und Straßenbetrieb. 4 Informationstage Geräuschmindernde Fahrbahnen in der Praxis – Lärmaktionsplanung 11, 12.06.2008
- BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz, Fassung 2015, Nomos Verlag, Baden-Baden
- DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung; Fassung 2011, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 52023: Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung der Ausflußzeit mit dem Straßenteer-Ausflußgerät, Meßverfahren, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Fassung 1989
- DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Fassung 2012, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 933-3: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 3: Bestimmung der Kornform – Plattig-

- keitskennzahl; Fassung 2012, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 933-6 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften – Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen; Fassung 2014, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 933-10: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen – Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung); Fassung 2009, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1097-4 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller; Fassung 2008, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren; Fassung 2008, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Fassung 2015, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Fassung 2015, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 12846-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Ausflusszeit mittels Ausflussviskosimeter – Teil 1: Bitumenemulsionen; Fassung 2011, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 13108, Teil 6: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt; Fassung 2013, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 13179-1: Prüfverfahren für mineralische Füller in bitumenhaltigen Mischungen - Teil 1: Delta-Ring- und Kugel-Verfahren; Fassung 2013, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 14770: Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Fassung 2012, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit; Fassung 2010, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- EHLERT, 2013: EHLERT, S.; PMA – Offenporiger Gussasphalt; Aktuelle Erfahrungen und Entwicklungen bei Straßen. NRW; Asphalt 07/2013; Giesel Verlag GmbH, Hannover, 2013
- EHLERT, 2014: EHLERT, S.; PMA – Gussasphalt mit Offenporiger Oberfläche; Erfahrungen aus aktuellen Projekten in NRW; Asphalt 06/2014, Giesel Verlag GmbH, Hannover, 2014
- HOFKO, ET. AL., 2015: HOFKO, B., DIMITROV, M., SCHWAB, O., WEISS, F., KASPAR-GIEBL, A., RECHBERGER, H., GROTHE, H.; Rundkorn statt Kantkorn; Asphalt 6/2015, Giesel Verlag GmbH; Hannover; 2015
- ISO/CD 3rd 11819-2: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: ‚The close-proximity method‘, Beuth Verlag, Bonn; 2015
- JANNICKE, 2009: JANNICKE, B.; Lärminderung auf allen Strecken ist möglich. PMA – Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche; Asphalt 5/2009; Giesel Verlag GmbH; Hannover, 2009
- JANNICKE, 2010: Jannicke, B.; Eine Erfolgsgeschichte: PMA-Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche und ohne Abstreusplitt; Straße und Autobahn; 8/2010 Kirschbaum Verlag, Bonn, 2010
- LACKNER, ET. AL., 2004: LACKNER, R., BLAB, R., JÄGER, A., SPIEGL, M., KAPPL, K., WISTUBA, M., GAGLIANO, B. & EBERHARDSTEINER, J.: Multiscale modeling as the basis for reliable predictions of the behavior of multi-composed materials, Progress in Engineering Computational Technology, Saxe-Coburg Publications, ISBN 1-874672-22-9, 2004
- LeiStra 3, 2011: Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr 3: Teilprojekt „Anpassung von Materialtechnologien zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften von Asphaltbelägen“, Zwischenbericht Nr. 2, 2011; unveröffentlicht

- M TA, 2011: Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), Köln, Ausgabe 2011
- NAUEN, 2014: NAUEN, S.; Experimentelle Ansprache und Optimierung der Rheologie von Asphaltmörteln, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2014; unveröffentlicht
- PLAKSJUK, 2014: PLAKSJUK, A.; Einfluss der Rheologie von Asphaltmörteln auf die Hohlraumverteilung und Verdichtbarkeit von Asphaltprobekörpern, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2014; unveröffentlicht
- RADENBERG, ET. AL., 2012: RADENBERG, M., RUBE, N., GOTTAUT, C.: Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit und Nutzungsdauer dichter Asphaltdeckschichten; Abschlussbericht zu dem BAST-Forschungsprojekt FE 07.0239/2010/AGB; Bochum, 2012; unveröffentlicht
- RLS 90, Ausgabe 1990: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen; FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 1990
- ROOT, 2013: ROOT, V.; Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr 3: Teilprojekt: „Fließverhalten von Mörtel im Straßen-Teer-Viskosimeter“; Zwischenbericht Nr. 1, 2013
- SEDAGHAT, 2012: SEDAGHAT, N.; Entwicklung und Validierung von labortechnischen Prüfverfahren für das Asphaltkonzept PMA, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2012; unveröffentlicht
- TL Asphalt-StB 07/13: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB), Ausgabe 2007/Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013
- TL Gestein-StB 07: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB), Ausgabe 2007/Fassung 2016, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2016
- TP Asphalt-StB, Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2016
- TP Asphalt-StB, Teil 20: Eindringtiefe an Gussasphaltwürfeln; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 22: Spurbildungsversuch; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2013
- TP Asphalt-StB, Teil 25 A1: Dynamischer Stempeldringversuch an Gussasphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2009
- TP Asphalt-StB, Teil 25 A2: Dynamischer Stempeldringversuch an Walzasphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2010
- TP Asphalt-StB, Teil 30: Herstellung von Marshall-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG); Ausgabe 2007/Fassung 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2009
- TP Asphalt-StB, Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV); Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2007
- TP Gestein-StB 08, Teil 4.1.4: Bestimmung der Korngrößenverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung); Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2008
- WÖRNER ET. AL., 2006: WÖRNER, T., BÖNISCH, S., SCHMATZ, M., BÖSEL, P.: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes im Laboratorium; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau Heft S 48, Bergisch Gladbach, 2006
- YIGITSOY, 2016: YIGITSOY, F.; Charakterisierung des Einflusses von viskositätsveränderten Bindemitteln auf das Verarbeitungsverhalten von Asphaltmörteln unter Variation des Größtkorns, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2016; unveröffentlicht

Bilder

- Bild 1: Prinzipskizze PMA in Anlehnung an [EHLERT, 2013]
- Bild 2: Ermittlung des Gestaltfaktors g aus dem Materialanteil nach [BECKENBAUER ET. AL., 2002]
- Bild 3: Mörtelanreicherungen an der Oberfläche [EHLERT, 2013]
- Bild 4: Mehrskalennmodell zur Abbildung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt [LACKNER, ET. AL., 2004]
- Bild 5: Schnittansicht und Draufsicht eines Straßen-Teer-Viskosimeter nach [DIN EN 12846-1]
- Bild 6: Viskosimeterhülse und Kugelventil [DIN EN 12846-1]
- Bild 7: Versuchsaufbau im Labor der Ruhr Universität Bochum
- Bild 8: Flussdiagramm des Untersuchungsprogramms
- Bild 9: Modifikation der Befestigungsposition des Fallgewichts bei der MPK-Prüfung
- Bild 10: Kraftmessdose zur Bestimmung der aufgebrachtten Aufprallkraft
- Bild 11: Modifizierte Probekörperhöhe am mod. MPK
- Bild 12: Darstellung der Hohlraumverteilung anhand des Weißanteils [SEDAGHAT, 2012]
- Bild 13: Siebrückstände der Luftstrahlsiebung
- Bild 14: Korngrößenverteilung der Füller durch Sedimentationsanalyse nach [DIN 18123]
- Bild 15: Versteifende Wirkung der untersuchten Füller unter Verwendung von Teilergebnissen von [YIGITSOY, 2016]
- Bild 16: Korngrößenverteilung der Natursande
- Bild 17: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung
- Bild 18: Einfluss des Bindemittels auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter
- Bild 19: Einfluss des Bindemittelvolumens auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter
- Bild 20: Einfluss des Größtkorns auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter (F/fGk 60:40)
- Bild 21: Einfluss der Füllerart auf die Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter
- Bild 22: Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf die Mörtelsteifigkeit
- Bild 23: Einfluss des Massenverhältnisses von Füller und feiner Gesteinskörnung auf die Mörtelsteifigkeit
- Bild 24: Schnittbild eines mod. MPK20 gemäß [AP PMA, 2015] in PMA-Bauweise
- Bild 25: Variation der Verdichtung bei der ersten Verdichtungsphase
- Bild 26: Hohlraumverteilung unter Variation der Lastzunahme (V70/30-B1)
- Bild 27: Simulation zweier Verdichtungsphasen zur praxisnahen Abbildung des Verdichtungsmanagement eines PMA
- Bild 28: Zeit-Eindringkurve am Beispiel eines ungesägten Bohrkerns – BK 60/40 gemäß [AP PMA, 2015]
- Bild 29: Zeit-Eindringkurve des dynamischen Stempel Eindringversuchs am Beispiel eines ungesägten Bohrkerns mit Bindemittel B1– BK 70/30 gemäß [AP PMA, 2015]
- Bild 30: Verlauf der Zunahme der Spurrinnentiefe unter Variation des Verdichtungsprogramms
- Bild 31: Mittelwerte und Spannweiten der Raumdichtbestimmung an MPK und BK
- Bild 32: Empfohlener Bereich für eine optimale Mörtelsteifigkeit
- Bild 33: Hohlraumverteilung am Schnittbild des mod. MPK20
- Bild 34: Hohlraumverteilung am Schnittbild einer Asphaltprobeplatte
- Bild 35: Hohlraumverteilung am Schnittbild des mod. MPK20 aus Asphaltmischgut der Variante A553
- Bild 36: Hohlraumverteilung am Schnittbild einer Asphaltprobeplatte aus Mischgut der Variante A553

- Bild 37: Sieblinie des extrahierten Gesteinsgerüsts von Baumaßnahme PS1
- Bild 38: Hohlraumverteilung am Schnittbild des mod. MPK20 aus Asphaltmischgut der Praxisvariante PS1
- Bild 39: Hohlraumverteilung am Schnittbild einer Asphaltprobeplatte aus Mischgut der Praxisvariante PS1

Tabellen

- Tab. 1: Richtwerte für PMA-Asphaltmischgut [AP PMA, 2015]
- Tab. 2: Problematiken in Bezug auf PMA
- Tab. 3: Auswahl projektbezogener Bindemittel
- Tab. 4: Auswahl projektbezogener Füller
- Tab. 5: Auswahl projektbezogener grober Gesteinskörnung
- Tab. 6: Auswahl projektbezogener feiner Gesteinskörnung
- Tab. 7: Rohdichten der Kalksteinfüller
- Tab. 8: Ergebnis der Luftstrahlsiebung der untersuchten Füller
- Tab. 9: Hohlraumgehalte nach Rigden der Kalksteinfüller
- Tab. 10: Rohdichten der Natursande
- Tab. 11: Fließkoeffizient ECS der Natursande
- Tab. 12: Rohdichten der groben Gesteinskörnung
- Tab. 13: Kennwerte der verwendeten Bitumen
- Tab. 14: Untersuchungsergebnisse der Mörtelsteifigkeit im Ausflussviskosimeter unter Variation des Bindemittelvolumens
- Tab. 15: Untersuchung der Mörtelsteifigkeit unter Variation des Bindemittels
- Tab. 16: Überblick über untersuchte Bindemittelvolumina
- Tab. 17: Auswahl von neun geeigneten Asphaltkonzepten für Untersuchungen an modifizierten Marshall-Probekörpern
- Tab. 18: Gemessene Raumdichten an Marshall-Probekörpern nach den in Kapitel 5.2.2 aufgelisteten Messmethoden
- Tab. 19: Gemessene Raumdichten an aus dreiviertel Fallhöhe hergestellten Marshall-Probekörpern nach den in Kapitel 5.2.2 aufgelisteten Messmethoden
- Tab. 20: Gemessene Raumdichten an aus halber Fallhöhe hergestellten Marshall-Probekörpern nach den in Kapitel 5.2.2 aufgelisteten Messmethoden
- Tab. 21: Mischgutzusammensetzung für die Untersuchungen mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät
- Tab. 22: Ergebnis der Raumdichte bei gleichzeitiger Herstellung von Mischgut für zwei Asphaltprobeplatten
- Tab. 23: Angepasster Herstellungsablauf für PMA-Mischgut
- Tab. 24: Ergebnisse der Raumdichtebestimmung mit dem angepassten Herstellungsablauf für PMA-Mischgut
- Tab. 25: Texturkennwerte unter Variation der Lastzunahme im Walzsektor-Verdichtungsgerät
- Tab. 26: Ergebnisse der Raumdichtebestimmung unter Variation der Lastzunahme im Walzsektor-Verdichtungsgerät
- Tab. 27: Volumetrische Kennwerte der modifizierten Bohrkerne unter Variation des Verdichtungsprogramms
- Tab. 28: Texturkennwerte an PMA-Probepplatten mit Verdichtung gemäß [AP PMA, 2015] und selbstdefiniertem Verdichtungsprogramm
- Tab. 29: Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen unter Variation des Verdichtungsprogramms
- Tab. 30: Ergebnisse der Variation der Trenneinlage
- Tab. 31: Ergebnisse des statischen Stempeldringversuchs an gesägten und ungesägten Probekörpern unter Verwendung von Mischgut mit Bindemittel B1
- Tab. 32: Ergebnis der dynamischen Stempeldringversuche an gesägten und ungesägten Bohrkernen unter Verwendung von Mischgut mit Bindemittel B1

- Tab. 33: Ergebnisse des Spurbildungsversuchs unter Variation des Verdichtungsregimes
- Tab. 34: Prüfvarianten zur Ermittlung des Verformungswiderstands unter Variation der Einflussparameter
- Tab. 35: Raumdichten an mod. MPK20 und gesägten mod. MPK20
- Tab. 36: Raumdichten an Bohrkernen und gesägten Bohrkernen
- Tab. 37: Texturkennwerte an PMA-Probepplatten nach Verdichtung gemäß [AP PMA, 2015]
- Tab. 38: Statische Stempeleindringtiefen an Marshall-Probekörpern
- Tab. 39: Statische Stempeleindringtiefen an Bohrkernen
- Tab. 40: Dynamische Stempeleindringtiefen an Bohrkernen
- Tab. 41: Ergebnisse des Spurbildungsversuchs
- Tab. 42: Angepasster Herstellungsablauf für PMA-Mischgut
- Tab. 43: Lastzunahme der anfangsbetonten, einphasigen Verdichtung für die Probepplattenherstellung
- Tab. 44: Zusammensetzung der sechs Mischgutvarianten zur Validierung
- Tab. 45: Mörtelsteifigkeiten der Varianten S3 und S4 bei 180 °C
- Tab. 46: Raumdichten der MPK der Varianten S3 und S4
- Tab. 47: Raumdichten der Bohrkern der Varianten S3 und S4
- Tab. 48: Anteil zugänglicher Hohlräume an MPK und BK
- Tab. 49: Ergebnisse der Texturmessung auf der Asphaltprobepplatte
- Tab. 50: Ergebnisse der dynamischen Stempeleindringversuche
- Tab. 51: Kornverlust an Probepplatten in der OVPM
- Tab. 52: Raumdichten der MPK der Varianten A33 und A553
- Tab. 53: Raumdichten der MPK der Varianten S33 und S553
- Tab. 54: Raumdichten der Bohrkern der Varianten A33 und A553
- Tab. 55: Raumdichten der Bohrkern der Varianten S33 und S553
- Tab. 56: Raumdichten der MPK aus den Erstprüfungen für die Baumaßnahme A33 und A553
- Tab. 57: Ergebnisse der Texturmessung auf den Asphaltprobepplatten
- Tab. 58: Anteil zugänglicher Hohlräume an MPK und BK
- Tab. 59: Ergebnisse der Dynamischen Stempeleindringversuche
- Tab. 60: OVPM – Kornverlust an Probepplatten, Praxismischgut
- Tab. 61: OVPM – Kornverlust an Probepplatten, Labormischgut
- Tab. 62: Angaben zum Kornverlust aus Erstprüfung
- Tab. 63: Mischgutzusammensetzung der Praxisbaumaßnahme
- Tab. 64: Weitere Asphaltkennwerte gemäß der Erstprüfung
- Tab. 65: Raumdichten der MPK
- Tab. 66: Raumdichten der Bohrkern aus Asphaltprobepplatten
- Tab. 67: Ergebnisse der Texturmessung
- Tab. 68: Anteil zugänglicher Hohlräume an MPK und BK
- Tab. 69: Ergebnis des Dynamischen Stempeleindringversuchs
- Tab. 70: OVPM – Kornverlust an Probepplatten, Versuchsstrecke

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2015

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähnig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarekeit temporärer Fahrbahnmarkierung
Kemper, Schacht, Klapproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

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

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

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

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

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

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

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

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

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

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

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

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

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

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

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

2017

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

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straubautechnischen Eigenschaften

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

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

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

S 109: **RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels**
Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: **Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)**
Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: **Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)**
Alisov, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: **Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt**
Zander, Buch, Birbaum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: **Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen**
Schellenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: **Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt**
Mollenhauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: **Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes**
Wistuba, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: **Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein**
Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: **Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau**
Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: **Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte**
Renken, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: **Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels**
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: **Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme**
Wacker, Scherckenbach, Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: **Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in**
Fest- und Lockergesteine
Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50

S 123: **Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils**
Stephan, Weigel € 19,00

S 124: **Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte**
Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: **Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie**
Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**
Freudenstein, Neudert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**
Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**
Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**
Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

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

www.schuenemann-verlag.de

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